



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO



LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

**O DESEMPENHO DA COMPARTIMENTAÇÃO HORIZONTAL SELETIVA NA
PROMOÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES**

Tese de Doutorado

Natal, RN

2016

LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

**O DESEMPENHO DA COMPARTIMENTAÇÃO HORIZONTAL SELETIVA NA
PROMOÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração II: Projeto, Morfologia e Conforto no Ambiente Construído.

Linha de pesquisa: Tecnologia e Conforto no Ambiente Construído.

Orientadora: **Prof.^a Dr.^a Edna Moura Pinto.**

Natal, RN

2016

Catálogo da Publicação na Fonte. Universidade Federal do Rio Grande do Norte / Biblioteca Setorial de Arquitetura.

Cunha, Leonardo Jorge Brasil de Freitas.

O desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da segurança contra incêndio em edificações / Leonardo Jorge Brasil de Freitas Cunha. – Natal, RN, 2016.

238f. : il.

Orientadora: Edna Moura Pinto.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Arquitetura.

1. Prevenção contra incêndio – Tese. 2. Segurança contra incêndio em edificações SCIE – Tese. 3. Compartimentação – Tese. 4. Simulação computacional – Tese. I. Pinto, Edna Moura. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BSE15

CDU 614.841

LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

**O DESEMPENHO DA COMPARTIMENTAÇÃO HORIZONTAL SELETIVA NA
PROMOÇÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Edna Moura Pinto.

Aprovado em 12 de abril de 2016

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Edna Moura Pinto
Presidente – UFRN

Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva
Examinador Externo – USP

Prof. Dr. George Cajaty Barbosa Braga
Examinador Externo – UnB

Prof. Dr. George Santos Marinho
Examinador Externo ao Programa – DEM/ UFRN

Prof.^a Dr.^a Solange Virgínia Galarça Goulart
Examinadora Interna – PPGAU/ UFRN

AGRADECIMENTOS

Na busca do êxito, percorremos caminhos sinuosos, porém necessários, antes de atingirmos nosso objetivo. Cabe às pessoas próximas balizarem-nos nas curvas desse percurso, colocando-nos oportunamente na trajetória correta. Como forma de reconhecimento, agradeço:

Ao meu pai, eterno ídolo, que me ensinou, mais por exemplos do que por palavras, os valores essenciais da vida;

À Ênia, companheira e grande incentivadora na continuidade dos meus estudos acadêmicos, mesmo diante de tantas responsabilidades laborais;

Ao professor e amigo Aldomar Pedrini, mentor acadêmico, que, dentre tantos outros ensinamentos de vida, me apresentou os caminhos da pesquisa acadêmica e alertou sobre a importância de se ter senso crítico;

À Professora Edna Moura, por ter me mostrado o tema ora abordado e por acreditar em meu potencial de desenvolvê-lo;

À professora Solange Goulart, companhia diária na base de pesquisa;

Aos membros do CONSUNI/ UFERSA por terem aprovado meu afastamento funcional, imprescindível nos momentos finais da pesquisa.

A todos aqui citados e aqueles porventura não mencionados meu sincero agradecimento.

“Frequentemente é necessário mais coragem para ousar fazer certo do que temer fazer errado.” (Abraham Lincoln).

RESUMO

No trabalho apresentam-se os resultados da pesquisa que aborda o desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da Segurança Contra Incêndio em Edificações – SCIE. A compartimentação horizontal é uma medida de proteção passiva de total controle por parte do arquiteto, passível de ser definida logo nas primeiras fases do processo projetual. Contudo, nota-se uma contínua reconfiguração dos ambientes em edificações acadêmicas, objetivando ajustá-los à demanda surgente por espaço. Assim, um determinado ambiente concebido inicialmente como uma ampla sala de aula pode se transformar em duas ou mais salas menores, por exemplo. Independentemente do momento em que ocorre a subdivisão, seja na fase de projeto ou durante a ocupação da edificação, as normas só consideram o ambiente compartimentado quando são empregados os elementos classificados como corta-fogo. Entretanto, considerando que os minutos iniciais de um incêndio são os mais importantes na proteção a vida, trabalhou-se a hipótese de que uma forma de particionamento ignorado pelas prescrições normativas é capaz de favorecer a evacuação e o resgate dos ocupantes ao promover exaustão da fumaça no ambiente incendiado. A partir de um modelo representativo de um ambiente acadêmico construído, utilizou-se a simulação computacional para testar o desempenho de um tipo de compartimentação horizontal seletiva com diferentes combinações de aberturas para exaustão da fumaça. Nos resultados obtidos demonstrou-se que a compartimentação horizontal seletiva é capaz de promover benefícios para os ocupantes durante a evacuação, tanto por promover maior altura da camada livre de fumaça, quanto por retardar o instante em que a temperatura limite para a sobrevivência humana é atingida.

Palavras-chave: Segurança Contra Incêndio em Edificações [SCIE]; Compartimentação; Simulação computacional.

ABSTRACT

The thesis presents the results of research that addresses the performance of selective horizontal partitioning to promote Fire Safety in Buildings - FSB. Horizontal partitioning is a passive protection measure, settable in the early stages of the design process and controlled by the architect. However, there is a frequent reconfiguration of the rooms in academic buildings to adjust them for the space demand. Thus, large classrooms could turn into two or more smaller rooms, for example. Regardless when the subdivision occurs in the design phase or during the occupation of the building, the regulations just ensures the compartmentation of the room if all fireguard devices are present in the room. Knowing the fire's first minutes are the most important for life protection, we defend the hypothesis that a kind of partitioning ignored by regulatory standards is able to favoring the building vacancy and occupants rescue, for promote the room's smoke exhaust. The performance of the selective horizontal partitioning due different blend of openings for smoke outlet was simulated on CFD software. The results indicate that selective horizontal partitioning is able to promote an upper smoke free layer and delay the indoor temperature growth.

Keywords: Fire Safety of Buildings [FSB]; Compartmentation; Computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2. 1: EXEMPLO DE CURVAS TEMPERATURA X TEMPO DE INCÊNDIO	27
FIGURA 2. 2: COMPARAÇÃO DA CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO PROPOSTAS PELA ASTM E-119 E PELA ABNT NBR 14432:2001.....	28
FIGURA 2. 3 – GRÁFICO DA APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO 2 NO INTERVALO INICIAL DE CINCO MINUTOS.....	30
FIGURA 2. 4 – RELAÇÃO ENTRE OPORTUNIDADE DE INTEGRAÇÃO E CUSTO DAS DECISÕES PROJETUAIS DURANTE O CICLO DE VIDA DE UMA EDIFICAÇÃO	35
FIGURA 2. 5 – DISTÂNCIA MÍNIMA (D) ENTRE ABERTURAS DE AMBIENTES COMPARTIMENTADOS: EM FACHADAS ORTOGONAIS, PARALELAS E NÃO COINCIDENTES.	54
FIGURA 2. 6 – DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE COMPARTIMENTAÇÃO VERTICAL EXTERNA	55
FIGURA 2. 7 – EXEMPLO ELUCIDATIVO DOS ESCOAMENTOS LAMINAR E TURBULENTO, A PARTIR DA FUMAÇA ORIUNDA DE UM INCENSO ACESO.....	61
FIGURA 3. 1 – FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO DO MÉTODO EMPREGADO NO PRESENTE TRABALHO	69
FIGURA 3. 2 - ARQUIVO DE TEXTO COM DADOS DE ENTRADA.....	71
FIGURA 3. 3 – SIMULAÇÃO EM CURSO	71
FIGURA 3. 4 – ARQUIVO DE DADOS TABULADOS	71
FIGURA 3. 5 – SAÍDA GRÁFICA COM ISOTERMAS.....	71
FIGURA 3. 6 – RESULTADO DO INCÊNDIO NO <i>SHOPPING</i> TOTAL, EM PORTO ALEGRE/RS.	72
FIGURA 3. 7 – RECONSTITUIÇÃO DO INCÊNDIO NO FDS.....	72
FIGURA 3. 8 – RESULTADO DO INCÊNDIO NO EDIFÍCIO CACIQUE, EM PORTO ALEGRE/ RS	73
FIGURA 3. 9 – RECONSTITUIÇÃO DO INCÊNDIO NO PYROSIM, A PARTIR DOS DADOS COLETADOS NA PERÍCIA DA EDIFICAÇÃO INCENDIADA	73
FIGURA 3. 10 – ENSAIO LABORATORIAL DA COMPARTIMENTAÇÃO VERTICAL EXTERNA.	73
FIGURA 3. 11 – REPRODUÇÃO DO ENSAIO NO FDS, COM BASE NOS DADOS COLETADOS NO EXPERIMENTO.....	73
FIGURA 3. 12 – FDS <i>MESH SIZE CALCULATOR</i> - EXEMPLO DE DADOS DE ENTRADA	78
FIGURA 3. 13 – FDS <i>MESH SIZE CALCULATOR</i> – RESULTADOS	79
FIGURA 3. 14 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO TÉRREO – BLOCO DE SALAS DE AULA DE DOIS PAVIMENTOS	81
FIGURA 3. 15 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO SUPERIOR – BLOCO DE SALAS DE AULA DE DOIS PAVIMENTOS.....	81
FIGURA 3. 16 – BSA2P - FACHADA FRONTAL	82
FIGURA 3. 17 – BSA2P - CORTE LONGITUDINAL.....	82
FIGURA 3. 18 – BSA2P – FACHADA LATERAL.....	82
FIGURA 3. 19 – BSA2P – CORTE TRANSVERSAL.....	82
FIGURA 3. 20 – VISTA INTERNA DO FOSSO DE SERVIÇO	83

FIGURA 3. 21 – CIRCULAÇÃO HORIZONTAL [CORREDOR] – DETALHE DO PAINEL DE COBOGÓS DO FOSSO	83
FIGURA 3. 22 – BSA2P-I – MOSSORÓ/RN	84
FIGURA 3. 23 – BSA2P-II – MOSSORÓ/RN	84
FIGURA 3. 24 – BSA2P – PAU DOS FERROS/RN	84
FIGURA 3. 25 – BSA2P – CARAÚBAS/RN	84
FIGURA 3. 26 – LCC – MOSSORÓ/RN	84
FIGURA 3. 27 – PROGRAD/NEAD– MOSSORÓ/RN	84
FIGURA 3. 28 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO TÉRREO – LCC.....	85
FIGURA 3. 29 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO SUPERIOR – LCC	85
FIGURA 3. 30 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO TÉRREO – PROGRAD/NEAD.....	86
FIGURA 3. 31 – PLANTA BAIXA: PAVIMENTO SUPERIOR – PROGRAD/NEAD	86
FIGURA 3. 32 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CASO-BASE, DE ACORDO COM O PROJETO ARQUITETÔNICO	87
FIGURA 3. 33 – COMPARTIMENTAÇÃO SELETIVA: VISTA SUPERIOR.....	88
FIGURA 3. 34 – COMPARTIMENTAÇÃO SELETIVA: SECÇÃO FRONTAL	88
FIGURA 3. 35 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘CBPLUS’ E ‘CBPLUS_OPEN’	89
FIGURA 3. 36 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘DIV’ E ‘DIVPLUS_OPEN’	89
FIGURA 3. 37 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘25-25PLUS’ E ‘25-25PLUS_OPEN’	89
FIGURA 3. 38 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘25-50PLUS’ E ‘25-50PLUS_OPEN’	89
FIGURA 3. 39 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘25-75PLUS’ E ‘25-75PLUS_OPEN’	90
FIGURA 3. 40 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘25-100PLUS’ E ‘25-100PLUS_OPEN’	90
FIGURA 3. 41 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘50-25PLUS’ E ‘50-25PLUS_OPEN’	90
FIGURA 3. 42 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘50-50PLUS’ E ‘50-50PLUS_OPEN’	90
FIGURA 3. 43 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘50-75PLUS’ E ‘50-75PLUS_OPEN’	91
FIGURA 3. 44 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘50-100PLUS’ E ‘50-100PLUS_OPEN’	91
FIGURA 3. 45 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘75-25PLUS’ E ‘75-25PLUS_OPEN’	91
FIGURA 3. 46 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘75-50PLUS’ E ‘75-50PLUS_OPEN’	91
FIGURA 3. 47 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘75-75PLUS’ E ‘75-75PLUS_OPEN’	92
FIGURA 3. 48 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘75-100PLUS’ E ‘75-100PLUS_OPEN’	92
FIGURA 3. 49 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘100-25PLUS’ E ‘100-25PLUS_OPEN’	92
FIGURA 3. 50 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘100-50PLUS’ E ‘100-50PLUS_OPEN’	92
FIGURA 3. 51 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘100-75PLUS’ E ‘100-75PLUS_OPEN’	93
FIGURA 3. 52 – REPRESENTAÇÃO DOS CASOS ‘100-100PLUS’ E ‘100-100PLUS_OPEN’	93
FIGURA 3. 53 – VISTA ANTERIOR DO CASO-BASE NO TESTE DE SENSIBILIDADE.....	95
FIGURA 3. 54 – VISTA POSTERIOR DO CASO- BASE NO TESTE DE SENSIBILIDADE	95
 FIGURA 4. 1 – FALHA NA INICIALIZAÇÃO POR MALHA DEMASIADAMENTE ESPAÇADA	 98

FIGURA 4. 2 – OBJETO INICIALMENTE PREVISTO PARA SUPORTAR AS CHAMAS (A) E A SIMPLIFICAÇÃO NECESSÁRIA PARA UTILIZAÇÃO DA MALHA GROSSEIRA (B)	99
FIGURA 4. 3 – FALHA NA INICIALIZAÇÃO DECORRENTE DO USO DE MALHA DEMASIADAMENTE REFINADA.....	100
FIGURA 4. 4 – ERRO NO PROCESSAMENTO DO CASO-BASE [CBPLUS] COM MALHA ‘MODERADA’	102
FIGURA 4. 5 – ERRO NO PROCESSAMENTO DO CASO-BASE [CBPLUS] COM MALHA ‘GROSSEIRA’	102
FIGURA 4. 6 – EXEMPLO DE GEOMETRIA SIMPLIFICADA REPRESENTATIVA DE UMA CARTEIRA ESCOLAR E CADEIRA DO PROFESSOR, COMPATÍVEL COM MALHA ‘GROSSEIRA’	103
FIGURA 4. 7 – APERFEIÇOAMENTO DA GEOMETRIA REPRESENTATIVA DE UMA CARTEIRA ESCOLAR, COMPATÍVEL COM MALHA DE 0,10 M.	103
FIGURA 4. 8 – APERFEIÇOAMENTO DA GEOMETRIA REPRESENTATIVA DA CADEIRA DO PROFESSOR, COMPATÍVEL COM MALHA DE 0,10 M.	103
FIGURA 4. 9 – APERFEIÇOAMENTO DA GEOMETRIA REPRESENTATIVA DA MESA DO PROFESSOR, COMPATÍVEL COM MALHA DE 0,10 M.	103
FIGURA 4. 10 – VISTA DO CASO-BASE APERFEIÇOADO – ‘CBPLUS’	104
FIGURA 4. 11 – CURVA TÍPICA DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS.	105
FIGURA 4. 12 – VISUALIZAÇÃO DO CASO ‘100-100PLUS’ AOS 102 SEG.	106
FIGURA 4. 13 – VISUALIZAÇÃO DO CASO ‘100-100PLUS’ AOS 204 SEG.	106
FIGURA 4. 14 – CURVA TÍPICA DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.	106
FIGURA 4. 15 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.	107
FIGURA 4. 16 – CURVA TÍPICA DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS.	108
FIGURA 4. 17 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS NA COTA DE 1,80 M.	108
FIGURA 4. 18 – CURVA TÍPICA DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.	109
FIGURA 4. 19 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS NA COTA DE 1,80 M: A MUDANÇA DE DIREÇÃO EM CADA CURVA INDICA O INSTANTE DE RUPTURA DA BANDEIROLA SOBRE A PORTA.	110
FIGURA 4. 20 – VISTA DO CASO-BASE APERFEIÇOADO [CBPLUS], COM DOMÍNIO EXPANDIDO NO EIXO Z	111
FIGURA 4. 21 – RECORTES DO ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS DO CASO ‘DIVPLUS’, DESCREVENDO: (A) AS CONSTANTES PERTINENTES À MECÂNICA DOS FLUIDOS E (B) AS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	112
FIGURA 4. 22 – GRÁFICO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DOS CASOS PROVIDOS DE COMPARTIMENTAÇÃO SELETIVA	115
FIGURA 4. 23 – RECORTE DO ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS DO CASO ‘DIVPLUS’, COM O TRECHO QUE DESCREVE A APLICAÇÃO DO COMANDO ‘RAMP_Q= “FIREMAP”’ ATRIBUINDO À CHAMA OS VALORES DO CRESCIMENTO MÉDIO DE INCÊNDIO, CONTIDOS NA TABELA 2. 2.	116

FIGURA 4. 24 – CURVA TÍPICA DO COMPORTAMENTO DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS.	117
FIGURA 4. 25 – CURVA TÍPICA DO COMPORTAMENTO DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR DOS CASOS COM ABERTURAS DE INTERCOMUNICAÇÃO COM O MEIO EXTERNO.	117
FIGURA 4. 26 – CURVA TÍPICA DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS DESPROVIDOS DE ABERTURA.	118
FIGURA 4. 27 – VISUALIZAÇÃO DO CRESCIMENTO DA CAMADA DE FUMAÇA DO CASO 'DIVPLUS', NOS INSTANTES (A) 0 S.; (B) 60 S.; (C) 105 S.; (D) 180 S.; (E) 240 S. E (F) 300 S.....	119
FIGURA 4. 28 – CURVA TÍPICA DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM ABERTURAS.	120
FIGURA 4. 29 – VISUALIZAÇÃO DO CRESCIMENTO DA CAMADA DE FUMAÇA DO CASO '50-50PLUS_OPEN', NOS INSTANTES (A) 0 S.; (B) 60 S.; (C) 120 S.; (D) 180 S.; (E) 240 S. E (F) 300 S.	120
FIGURA 4. 30 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS.	121
FIGURA 4. 31 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.....	122
FIGURA 4. 32 – GRÁFICO DA CAMADA VISÍVEL DOS CASOS 'DIVPLUS' E '25-25PLUS' NOS INSTANTES INICIAIS DA SIMULAÇÃO, COM AS RESPECTIVAS APROXIMAÇÕES MATEMÁTICAS.	123
FIGURA 4. 33 – CURVA TÍPICA DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS DESPROVIDOS DE ABERTURA.	125
FIGURA 4. 34 – CURVAS TÍPICAS DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM ABERTURA.....	125
FIGURA 4. 35 – CURVA TÍPICA DO GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.....	126
FIGURA 4. 36 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA ELEVAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA NA COTA DE 1,80 M DOS CASOS COM AS JANELAS ABERTAS.....	127
FIGURA 4. 37 – SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA ELEVAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA NA COTA DE 1,80M DOS CASOS COM AS JANELAS FECHADAS.....	127
FIGURA 4. 38 – INCREMENTO NO TEMPO DE ESCAPE - JANELAS FECHADAS (TEMP.<50 °C; H=1,80 M)	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 – PARÂMETRO DE DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO	29
TABELA 2. 2 – TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR NA FASE DE IGNIÇÃO (KW).....	30
TABELA 2. 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS NORMAS VIGENTES	47
TABELA 2. 4 – DISTÂNCIA MÍNIMA ENTRE ABERTURAS DE AMBIENTES COMPARTIMENTADOS	54
TABELA 2. 5 – COMPARATIVO DOS <i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO.....	65
TABELA 3. 1 – REFINAMENTO DE MALHA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO CARACTERÍSTICO DA CHAMA.....	80
TABELA 3. 2 – CASOS SIMULADOS	89
TABELA 3. 3 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO CASO BASE	96
TABELA 3. 4 – DIMENSIONAMENTO DA MALHA.....	96
TABELA 4. 1 – RESULTADO DO TESTE DE SENSIBILIDADE DO CASO BASE.....	100
TABELA 4. 2 – CONFIGURAÇÕES DE DOMÍNIO E MALHA DOS CASOS-BASE ORIGINAL [CB] E APERFEIÇOADO [CBPLUS]	101
TABELA 4. 3 – CONFIGURAÇÃO DEFINITIVA DAS SIMULAÇÕES	111
TABELA 4. 4 – TEMPO DE PROCESSAMENTO DAS SIMULAÇÕES DEFINITIVAS.....	114

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_g	Temperatura dos gases no instante “t” (° C)
θ_0	Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento (° C), geralmente tomada igual a 20 °C.
Q_g	Taxa de liberação de calor na etapa de crescimento do incêndio (kW).
α	Parâmetro de desenvolvimento do incêndio (kJ/s ³).
t_i	Tempo de início da ignição, normalmente tido como zero (s).
t	Tempo do incêndio (s).
D^*	Diâmetro da chama (variável teórica utilizada pelo <i>software</i> FDS) (m)
dx	Dimensão linear, no eixo da abcissa, das células que compõem a malha (m).
H_{cv}	Altura da camada visível do caso de referência ‘DIVplus’ (m).
H_{cs}	Altura da camada visível representativa dos casos providos de compartimentação seletiva (m).
H_0	Altura do ambiente [pé-direito], de piso a forro (m).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AsBEA	Associação Brasileira de Escritórios de Arquitetura.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i> (Reino Unido).
BSA2P	Bloco de Salas de Aulas de dois pavimentos
CAD	<i>Computer aided design</i> (ou: Desenho assistido por computador).
CBMRN	Corpo de Bombeiros Militares do Rio Grande do Norte.
CBPMESP	Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (ou: Dinâmica computacional de fluidos).
DARQ	Departamento de Arquitetura.
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i> (ou, em uma tradução livre: Simulação Numérica Direta - modelo de turbulência).
EUA	Estados Unidos da América.
FAUUSP	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i> (software).
IABr	Instituto Aço Brasil.
IBC	<i>International Building Code.</i>
IFES	Instituição Federal de Ensino Superior.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
IT	Instrução Técnica.
LabSec	Laboratório de Sistemas Construtivos – DARQ/UFRN.
LCC	Bloco de Laboratórios de Ciência da Computação (UFERSA)
LES	<i>Large Eddy Simulation</i> (ou, em uma tradução livre: Simulação de Grandes Vórtices).
MEC	Ministério da Educação.
NBR	Norma Brasileira.
NEAD	Núcleo de Educação a Distância (UFERSA).
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i> (Entidade Norte-americana).

NIST	<i>National Institute of Standards and Technology.</i>
NR	Norma Regulamentadora, Ministério do Trabalho.
PPGAU	Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.
PROGRAD	Pró-reitoria de graduação (UFERSA).
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier–Stokes</i> , (modelo de turbulência).
RN	Rio Grande do Norte (Unidade Federativa).
RS	Rio Grande do Sul (Unidade Federativa).
SCI	Segurança Contra Incêndio.
SCIE	Segurança Contra Incêndio em Edificações.
SIN	Superintendência de Infraestrutura.
SMV	<i>Smokeview (software).</i>
SP	São Paulo (Unidade Federativa).
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo.
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
USP	Universidade de São Paulo.

SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>18</u>
1.1	Contextualização e Definição do tema	21
1.2	Hipótese	22
1.3	Objetivo Geral	23
1.4	Objetivos Específicos	23
<u>2</u>	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>25</u>
2.1	Fogo e Incêndio	25
2.2	Segurança contra incêndio	30
2.3	Projeto arquitetônico e a segurança contra incêndio	33
2.4	Controle de fumaça	40
2.5	Normatização	43
2.6	Compartimentação	49
2.6.1	Elementos de compartimentação	51
2.6.2	Classificação espacial da compartimentação	53
2.6.3	Falhas nos sistemas de compartimentação	56
2.6.4	Aplicabilidade e discussões	57
2.7	Simulação Computacional	58
2.7.1	Simulação computacional de Fluidos	59
2.7.2	Modelos de turbulência	60
2.7.3	Simulação Computacional de incêndio	62

<u>3</u>	<u>MATERIAL E PROCEDIMENTOS</u>	<u>67</u>
3.1	Fire Dynamics Simulator - FDS	69
3.1.1	Condições de contorno	74
3.1.2	Definições da malha	77
3.2	Objeto de estudo	80
3.3	Definição do Modelo: Caso-base e variações	87
3.4	Critérios de Análise	93
3.5	Teste de sensibilidade	95
<u>4</u>	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>98</u>
4.1	Discussão preliminar	98
4.2	Resultados obtidos	111
4.2.1	Tempo de processamento	112
4.2.2	Taxa de liberação de calor	116
4.2.3	Altura da camada livre de fumaça	118
4.2.4	Gradiente vertical de temperatura	124
<u>5</u>	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	<u>129</u>
5.1	Quanto aos resultados	129
5.2	Quanto ao <i>software</i> utilizado	131
5.3	Desdobramentos e sugestões de trabalhos futuros	133
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>135</u>
	<u>APÊNDICE A - TESTES PRELIMINARES</u>	<u>146</u>

<u>APÊNDICE B - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES DEFINITIVAS– PARÂMETRO “&MATL ID”</u>	<u>153</u>
---	-------------------

<u>APÊNDICE C - PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES – PARÂMETRO “&SURF ID”</u>	<u>154</u>
--	-------------------

<u>APÊNDICE D – ARQUIVO DE ENTRADO DE DADOS DO CASO ‘CBPLUS’</u>	<u>155</u>
---	-------------------

<u>APÊNDICE E - RESUMO DAS SAÍDAS GRÁFICAS DAS SIMULAÇÕES DEFINITIVAS</u>	<u>165</u>
--	-------------------

1 INTRODUÇÃO

O incêndio é um dos mais graves incidentes¹ que podem acontecer em uma edificação, uma vez que, além dos danos materiais, também está fortemente associado à perda de vidas humanas (ROSA, 2010). A segurança contra incêndio em edificações [SCIE] é uma área de estudo relativamente nova no Brasil, sendo ainda mais recente a abordagem arquitetônica do tema. Discussões e regulamentações sobre o assunto ganharam notoriedade nacional depois dos incêndios ocorridos em edifícios verticais na cidade de São Paulo/SP na década de 1970, em especial o incêndio no Edifício Joelma, que resultou na morte de 179 pessoas. Recentemente, a ocorrência do incêndio na Boate *Kiss*, em Santa Maria/RS, instigou novamente a comoção popular e exigiu das autoridades providências diante da gravidade do fato e da dificuldade de resgate.

No contexto atual, a rápida e abrangente divulgação dos casos de incêndios nas diversas mídias expõe a importância da SCIE de todos os profissionais da área de construção civil. Apesar da constante transformação do conceito para atender o enorme impacto social e econômico que esse tipo de sinistro pode provocar, é consenso que o objetivo da SCIE é preservar a vida, o patrimônio e a integridade da edificação, nessa ordem de preferência. Contudo, há de se considerar também a proteção dos profissionais responsáveis pela evacuação, salvamento e combate, assim como a proteção das pessoas e das edificações do entorno.

Recentemente, discute-se também o impacto ambiental que um incêndio produz, a exemplo do ocorrido em abril de 2015 no terminal da empresa Ultracargo, na cidade de Santos/SP, no qual a grande quantidade de produtos químicos utilizados para apagá-lo e o intenso calor dissipado durante os nove dias de sinistro provocaram danos irreversíveis no ecossistema vulnerável circundante (ZANCHETTA e CASTRO, 2015).

¹ O termo originalmente empregado por Rosa (2010) é 'acidente'. A substituição por 'incidente' segue a linha de raciocínio de Silva, ao afirmar que: "No passado acreditava-se que o incêndio era obra do acaso e a vítima uma infortunada. Hoje sabe-se que o incêndio é uma ação controlável e as vítimas (...) são consequência da ignorância ou de ato criminoso" (SILVA, 2001, Prefácio).

A questão do incêndio é, normalmente, associada ao Corpo de Bombeiros, enquanto entidade responsável pelas ações de prevenção, combate e resgate; ou aos engenheiros civis e de segurança, responsáveis pelos projetos complementares e pelas ações de prevenção. Entretanto, reduzir a duas categorias profissionais a responsabilidade por um incidente de grande impacto social é certamente uma atitude equivocada. Diversos outros profissionais envolvidos na construção, manutenção e gestão da edificação, bem como os próprios usuários, possuem um significativo grau de responsabilidade na promoção da SCIE. No campo de ação da arquitetura, a SCIE está associada ao conjunto de soluções projetuais voltadas para a proteção dos ocupantes e mitigação da propagação.

Assim como os demais requisitos básicos de desempenho de edificações, a SCIE deve ser considerada desde as fases iniciais de projeto, pois é nesse momento que os problemas podem ser resolvidos com menor custo. Todavia, a SCIE é pouco contemplada no currículo acadêmico dos cursos de arquitetura (ONO, 2011). Isso ajuda a explicar por que são raros os arquitetos que a consideram no desenvolvimento do projeto. Usualmente, o tema costuma ser relegado a uma categoria de importância secundária, atendida meramente para fins de aprovação burocrática junto aos órgãos oficiais.

O arquiteto pouco familiarizado com o tema tende a acatar integralmente as alterações projetuais propostas por um especialista e, em muitos casos, passa a repeti-las nos projetos posteriores, sem distinção, com o objetivo de acelerar o processo de aprovação junto aos órgãos competentes. Forma-se, então, uma prática viciosa em que conceitos empíricos, criados ou revisados com base em casos específicos, são replicados em projetos de naturezas diversas sem o devido cuidado no ajuste da escala, da tipologia e dos usuários envolvidos. Logo, as medidas passivas, que poderiam ser a maior contribuição por parte do arquiteto na promoção da SCIE, deixam de configurar como itens de possível exploração durante a concepção do projeto.

Uma medida de proteção passiva determinante na SCIE é a compartimentação da edificação, que consiste na subdivisão do edifício em ‘células’ capazes de confinar a ação do incêndio no ambiente de origem. A compartimentação horizontal visa evitar a propagação do incêndio ao longo de um

pavimento, enquanto que a vertical busca impedir o avanço entre pavimentos sucessivos. Por restringir as chamas e seus subprodutos no interior do ambiente de origem, a compartimentação contribui efetivamente tanto para a evacuação segura dos ocupantes do restante da edificação, quanto nas operações de combate ao fogo (ABNT NBR 14432: 2000, p. 1).

A compartimentação é uma medida de proteção passiva de elevado controle por parte do arquiteto, diferentemente do controle da carga de incêndio ou da quantidade de usuários, por exemplo. Contudo, a inserção de medidas passivas no projeto arquitetônico tende a ser desencorajada em prol de soluções ativas tradicionais, devido à falta de formação técnica ou ao desinteresse pelo tema por parte dos arquitetos. Logo, as medidas ativas de proteção, que deveriam ser encaradas como complementares àquelas de ordem passiva, ficam encarregadas de promover integralmente a SCI na edificação.

A avaliação típica da compartimentação é feita por meio da verificação dos elementos característicos e suas dimensões. A certificação atual segue uma distinção binária, do tipo: 'existe' ou 'não existe', bastando a ausência de um único elemento para que a edificação seja classificada como não compartimentada. Desse modo, pouca atenção é dada ao desempenho dos elementos não previstos nas normas. Corroborando o pensamento de Ono (2011), que destaca a tendência mundial em seguir recomendações com base no desempenho, torna-se justificável a avaliação da eficiência dos elementos ignorados pelos códigos prescritivos tradicionais no contexto atual.

A possibilidade de avaliar o desempenho das medidas passivas de SCIE por meio de uma ferramenta compatível com a atividade projetual tende a ser uma prática prudente e proveitosa. Nesse contexto, a simulação computacional pode ser encarada como um instrumento complementar aos métodos experimentais ou à coleta de dados em casos acidentais, pois permite a análise de múltiplas alternativas sem os riscos ou os custos inerentes aos métodos laboratoriais ou ocasionais. Os *softwares* de dinâmica computacional de fluidos [CFD, na sigla em inglês] são capazes de simular a dinâmica do fogo, a propagação do calor e a dispersão da fumaça.

Acredita-se que as ferramentas de simulação computacional, adequadamente ajustadas e com aceitável grau de incerteza, favoreçam tanto a compreensão do comportamento do incêndio, quanto à criação, a revisão e o aperfeiçoamento das normas técnicas de SCIE. Todavia, sabe-se que a aceitação da avaliação de desempenho por meio da simulação computacional não é consensual, pois ainda existem dúvidas em relação ao desempenho dos *softwares* e questionamentos quanto a sua capacidade de reproduzir um incêndio (RUSCHEL, 2011). Nesse sentido, o autor do presente trabalho compartilha a opinião de Silva (2014), que afirma: “antes de se avançar para modelos computacionais, devem-se conhecer os métodos prescritivos e os conceitos sobre o tema” (SILVA, 2014, p. 107).

1.1 Contextualização e Definição do tema

A dinâmica dos cursos universitários tem incitado a construção de prédios que permitam o constante rearranjo espacial interno, de modo a acomodar a demanda por espaço e as peculiaridades de cada curso. O uso da planta livre é um recurso consolidado e recorrente em projetos de grande porte ou em edifícios de escritórios (ALVES, 2010, p. 78). Logo, projetos modulados em grandes vãos e sem particionamento horizontal ganham a preferência dos gestores por permitir espaços flexíveis com vistas a mudanças de layout. Contudo, Negrisola (2011) alerta que “se antes um incêndio ficava limitado a um escritório, hoje ele tende a abranger todo um piso.” (NEGRISOLA, 2011, p. 214).

Observando as prescrições normativas, percebe-se que subdivisões realizadas durante a fase de ocupação dificilmente seriam aceitas como elementos de compartimentação, pois em uma situação de incêndio não atenderiam de modo satisfatório aos requisitos de isolamento, estanqueidade, e, principalmente, integridade. A construção da hipótese tratada na pesquisa partiu do princípio que espaços parcialmente compartimentados podem apresentar desempenho superior de SCIE em relação ao vão livre, desde que as divisórias não configurem obstáculos às saídas de emergência. Concomitante a esse raciocínio, Silva (2014), afirma que os minutos iniciais de um incêndio são os mais importantes na salvaguarda dos ocupantes, pois é quando ocorre a evacuação do prédio e o resgate dos ocupantes;

e que a maior parte dos óbitos ocorre por inalação de fumaça. Ainda na linha do raciocínio pretendido é possível identificar um relevante ponto levantado por Costa, Ono e Silva (2005), no artigo que trata da relação entre compartimentação e o dimensionamento das estruturas de concreto:

“Não foi encontrada a diferenciação entre compartimentação ao calor e à fumaça. A fumaça tóxica, embora responsável pela maior parte dos óbitos em incêndios, não causa prejuízo às estruturas. São possíveis compartimentos contendo aberturas que permitem apenas a passagem de fumaça mas, na existência de baixa carga de incêndio, é improvável a transferência de chamas ou calor significativo. A legislação deve prever a diferença entre compartimentar o calor ou a fumaça” (Costa, Ono e Silva, 2005, p. 24).

A preocupação originalmente exposta no artigo com as estruturas de concreto pode ser estendida para proteção dos ocupantes. Logo, condensando as assertivas dos autores citados, torna-se plausível a ideia de que um elemento de vedação provido de aberturas para exaustão da fumaça, mas capaz de confinar chamas e calor no ambiente de origem, poderia proporcionar melhores condições de escape aos ocupantes da edificação em uma situação de incêndio. Tomou-se a liberdade de denominar esse sistema de ‘compartimentação seletiva’.

Os instrumentos normativos que tratam da exaustão da fumaça concentram-se nos sistemas ativos ou em abertura dispostas na cobertura, a exemplo da Instrução Técnica nº 15/ 2011 (CBPMESP, 2011). Nesse sentido, o ineditismo da pesquisa consiste em estudar um modo de exaustão passiva da fumaça por meio de um elemento de vedação vertical, que proporcionasse maior tempo de escape aos ocupantes. É importante esclarecer que a intenção foi propor e analisar um sistema que se soma às prescrições normativas vigentes. Nesse sentido, a compartimentação seletiva abordada no presente trabalho destina-se, principalmente, à subdivisão de um ambiente maior e originalmente compartimentado, esse sim constituído de todos os elementos prescritos em norma.

1.2 Hipótese

Os códigos prescritivos ignoram as formas alternativas que a compartimentação pode assumir nas edificações. Categorizar a compartimentação

de forma binária [“é” ou “não é”] invalida diversas alternativas que podem apresentar desempenho satisfatório. Defende-se que um pavimento parcialmente compartimentado, ou seja, que não dispõe de todos os elementos típicos da compartimentação normativa, apresenta maior nível de proteção para os ocupantes em relação ao mesmo pavimento livre ou isento de qualquer elemento delimitador do espaço. Logo, a hipótese desenvolvida foi que a compartimentação horizontal seletiva, que promove a exaustão dos subprodutos gasosos e confina chama e calor ao ambiente de origem, pode beneficiar as condições de escape dos ocupantes da edificação em uma situação de incêndio.

1.3 Objetivo Geral

Propor e analisar, com o auxílio da simulação computacional, uma forma de compartimentação horizontal seletiva aplicada em um modelo representativo de uma edificação acadêmica de médio porte.

1.4 Objetivos Específicos

1. Abordar as formas de compartimentação contidas nos instrumentos normativos, enquanto medida de SCI pertinentes ao projeto arquitetônico;
2. Propor uma forma alternativa de compartimentação aplicável a edificações de médio porte;
3. Analisar, por meio da simulação computacional, o desempenho da compartimentação seletiva proposta, por meio da comparação dos resultados com um caso de referência, que representa o particionamento convencional;
4. Apresentar, com base na experiência apreendida ao longo da pesquisa, as potencialidades e dificuldades de utilização da simulação computacional de incêndio por parte do arquiteto.

Por fim, é válido destacar que a pesquisa não objetivou a elaboração de um documento demasiadamente extenso ou pretensiosamente conclusivo sobre a segurança contra incêndios nas edificações. Logo, evitou-se a desnecessária transcrição de longos trechos das prescrições normativas e de suas imagens e tabelas, por entendermos que esses documentos são de domínio público e, portanto, podem ser facilmente consultados por meio da internet, por exemplo.

Recomenda-se que o leitor consulte os documentos originais quando o sentir-se instigado a obter informações complementares ou maior embasamento a respeito dos assuntos abordados ao longo do texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fogo e Incêndio

O conceito de fogo e incêndio é universalmente conhecido e amplamente disseminado na bibliografia de diferentes áreas do conhecimento, com seu respectivo grau de aprofundamento. A ABNT NBR 13860:1997 (p.6) define fogo como o “processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”, Por sua vez, combustão é definida pela mesma norma como a “reação exotérmica de um combustível com um comburente, geralmente acompanhada de chamas ou brasas ou emissão de fumaça” (op. cit., p. 4). O incêndio define a situação na qual o fogo tomou proporções fora de controle (ONO, 2010) e tende a se desenvolver plenamente enquanto houver combustível e oxigênio disponível para alimentar a chama.

A causa de um incêndio pode ser interna ou externa à edificação, em função da origem do fogo. A causa externa pode ocorrer tanto pelo contato direto das chamas geradas fora da edificação com os materiais combustíveis presentes internamente, quanto por indução à temperatura de ignição em função do calor absorvido por irradiação ou convecção. O desenvolvimento de um incêndio depende, basicamente, dos seguintes fatores: (1) quantidade e distribuição do material combustível, tecnicamente denominado ‘carga de incêndio’; (2) tamanho e situação das fontes combustíveis; (3) dimensão e posição das aberturas; (4) velocidade e direção do vento e (5) a forma e dimensão do recinto. Contudo, apesar da importância dos demais fatores, a carga de incêndio é o item primordial na determinação da magnitude do sinistro (VENEZIA, 2004).

A deflagração de um incêndio ocorre em etapas sucessivas. O primeiro momento é a ignição de um material combustível na presença do ar, gerando uma chama ou brasa. Havendo condições propícias o fogo tende a se desenvolver livremente, por meio de uma reação em cadeia, liberando gases quentes que se acumulam junto porção superior do ambiente. A movimentação dos gases aquecidos e a energia irradiada pelas chamas aquecem rapidamente todas as superfícies e os

elementos do entorno. O contínuo aumento da temperatura pode resultar na combustão generalizada, fenômeno conhecido por *flashover*² ou deflagração.

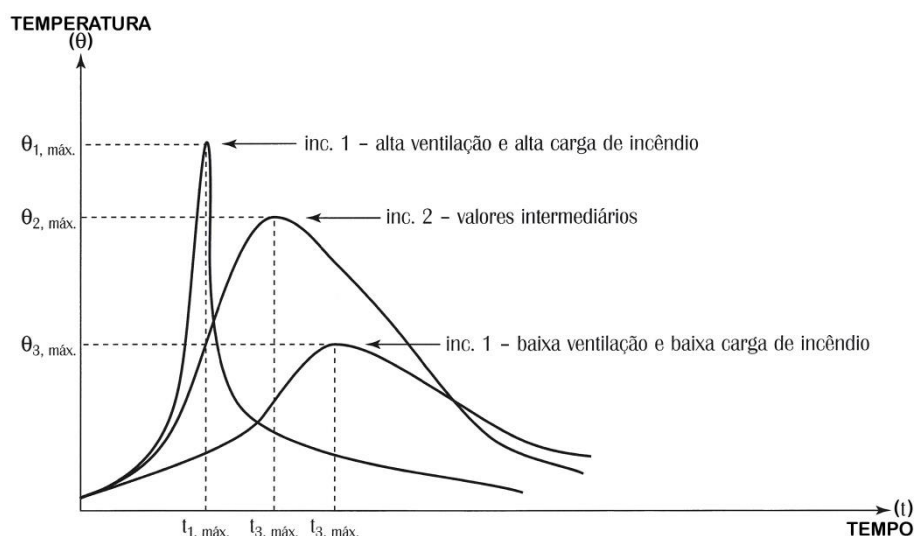
Mitidieri (*In: SEITO [coord.] et al., 2008, p. 64*), citando Martín e Peres (1982) afirma que “a inflamação generalizada ocorre em um tempo máximo de 20 minutos após o início do incêndio” (MITIDIERI. *In: Ibid., 2008, p. 64*). Todavia, estudos de caso e ensaios laboratoriais apontam que o período de três a cinco minutos após a ignição inicial é suficiente para que a deflagração ocorra em ambientes de dimensão reduzida. Durante a fase de desenvolvimento, a temperatura do ambiente pode atingir valores acima de 1.100 °C (SEITO *In: Ibid., 2008, p. 46*). A temperatura pode ser estimada, com certa precisão, por meio da tonalidade da chama (VENEZIA, 2004) durante o incêndio ou com base no ponto de fusão dos metais derretido pelas chamas, em vistorias posteriores ao incidente.

Em ambientes fechados, o oxigênio é consumido rapidamente durante o incêndio. A insuficiência de oxigênio implica na queima incompleta do material combustível, que ocasiona a redução da temperatura, porém com o aumento na produção de monóxido de carbono [CO] e de fuligem. Contudo, um novo ciclo de combustão generalizada pode ocorrer caso haja a abertura repentina de um vão que permita a admissão de ar externo, rico em oxigênio. Esse fenômeno recebe o nome de *backdraft*.

Uma forma de caracterizar graficamente a evolução de um incêndio é por meio da curva temperatura x tempo, a qual permite verificar, dentre outras informações, as etapas de ignição, *flashover*, desenvolvimento e extinção, bem como a temperatura máxima alcançada e a duração do incêndio. Diferentes combinações das variáveis anteriormente citadas geram curvas naturais de incêndio distintas, sendo impossível definir uma curva única e representativa. Na Figura 2. 1 ilustram-se três exemplos de como a curva de incêndio pode variar em função da ventilação e da carga de incêndio.

² O *flashover* não constitui uma fase propriamente dita do incêndio e sim um comportamento extremo do fogo. O *flashover* refere-se, portanto, ao instante que marca a passagem da fase de crescimento para a fase de incêndio completamente desenvolvido.

Figura 2. 1: Exemplo de curvas temperatura x tempo de incêndio



Fonte: SILVA (2014, p. 84), Adaptado.

As curvas naturais de incêndio podem ser modeladas matematicamente, com o objetivo de caracterizar o fenômeno com maior realismo, mas são inadequadas para o cálculo de resistência ao fogo dos elementos estruturais e dos dispositivos de compartimentação. Sobre esse assunto, Costa; Ono e Silva (2005) afirmam que:

“Há uma dificuldade operacional de realizar testes de resistência ao fogo utilizando essas curvas, porque existem inúmeras combinações entre as características do cenário de incêndio, e que geram inúmeros modelos de incêndio possíveis. Daí a necessidade de padronização de uma curva de incêndio e de ensaios de resistência ao fogo dos materiais”. (COSTA; ONO e SILVA, 2005, p 11).

Nesse sentido, foi formulada a curva padrão de incêndio com base nas temperaturas máximas aferidas em incêndios reais, que é aceita internacionalmente nos testes de resistência dos elementos estruturais. A ABNT NBR 14432:2001 apresenta a equação 2.1 para a determinação do incêndio padrão³, baseada na curva proposta pela ISO 834 (COSTA; ONO E SILVA, 2005).

³ Também presente na ABNT NBR 5628:2001

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (\text{Equação 2. 1})$$

Sendo:

t: Tempo, em minutos;

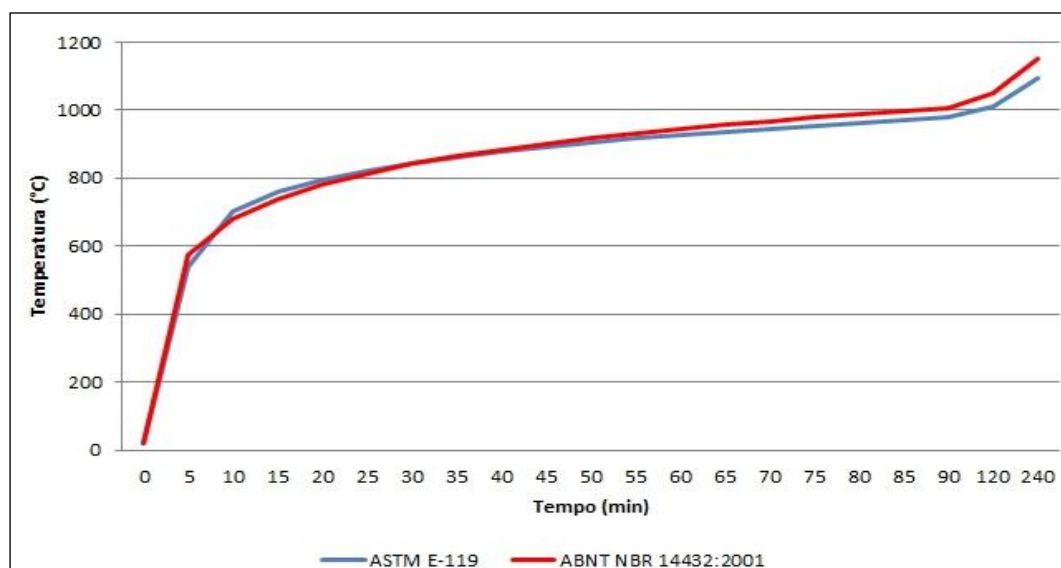
θ_0 : Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20 °C;

θ_g : Temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

A natureza logarítmica da equação remete a valores permanentemente crescentes de temperatura ao longo do tempo, com acentuada ascensão nos primeiros instantes, seguido de um crescimento paulatino após os 30 primeiros minutos.

A norma americana E-119, intitulada '*Standard test methods for fire tests of buildings construction and materials*', adotada pela *American Society for Testing and Materials* [ASTM] adota, desde 1918, uma tabela com valores temporais de temperatura dos gases em sua definição de incêndio padrão. A curva resultante dos dados tabelados pela E-119 (ASTM, 2000) é tida como a ancestral de todas as curvas padrão de incêndio, difundidas nos códigos normativos de diversos países. De fato, observa-se estreita aproximação entre as curvas padrão de incêndio propostas pela ABNT NBR 14432:2001 pela ASTM E-119, conforme pode ser observado na Figura 2. 2.

Figura 2. 2: Comparação da curva de incêndio padrão propostas pela ASTM E-119 e pela ABNT NBR 14432:2001



É preciso destacar que a curva padrão não representa o comportamento real de um incêndio: trata-se de uma convenção para determinação do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo [TRRF] de sistemas estruturais ou de elementos corta-fogo.

Por definição, a curva padrão não é adequada para representar as etapas anteriores ao *flashover* e não há outra curva específica que seja internacionalmente reconhecida para tal propósito. Contudo, Seito. (In: SEITO [coord.] et al., 2008, p. 45) apresentam uma série de equações, propostas pela norma britânica BS 3974/2001: *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Code of practice*, que caracterizam todas as etapas de incêndio. De acordo com a norma britânica, a taxa de liberação de calor na etapa anterior à deflagração é estimada pela equação 2:

$$Q_g = \alpha (t - t_i)^2 \quad (\text{Equação 2. 2})$$

Sendo:

Q_g : Taxa de liberação de calor na etapa de crescimento do incêndio, em kW;

t : Tempo do incêndio, em segundos;

t_i : Tempo de início da ignição, normalmente tido como zero, em segundo;

α : Parâmetro de desenvolvimento do incêndio, em kJ/s³;

Os valores de α , que cresce sob uma razão aproximada de quatro vezes, são determinados em função do tipo de crescimento do incêndio, conforme a Tabela 2. 1.

Tabela 2. 1 – Parâmetro de desenvolvimento do incêndio

CRESCIMENTO DO INCÊNDIO	α (kJ/s ³)
Lento	0,0029
Médio	0,012
Rápido	0,047
Ultrarrápido	0,188

Fonte: Seito (et al., 2008, p. 45), Adaptado.

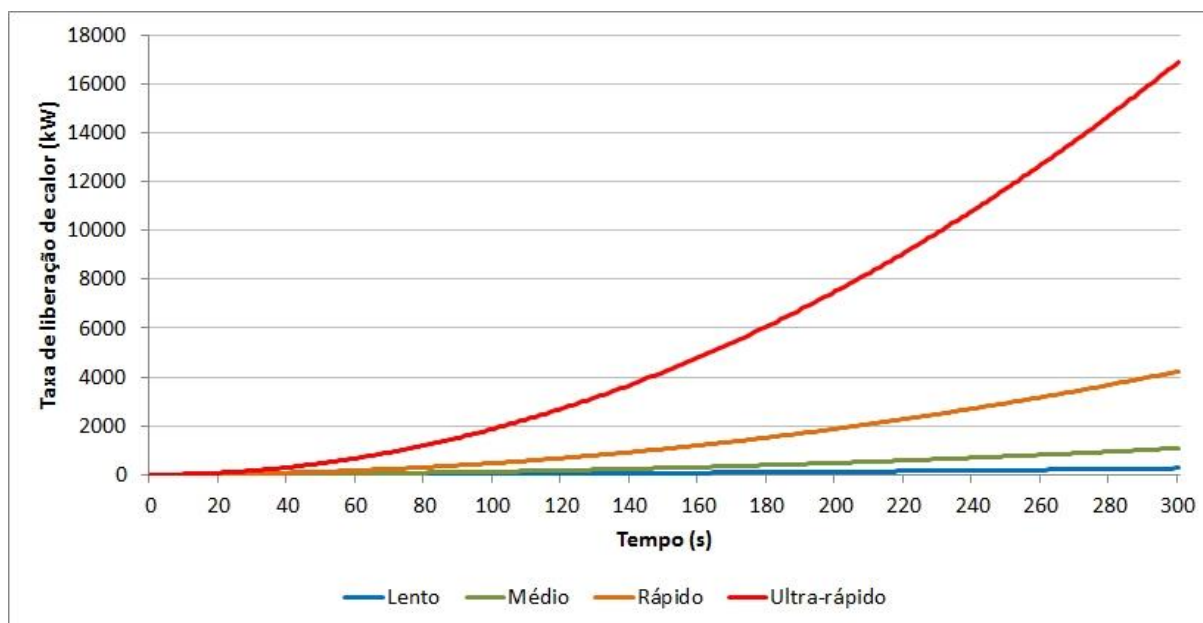
Aplicando a equação 2.2 para o intervalo inicial de cinco minutos, obtêm-se os seguintes valores de taxa de liberação e calor (Tabela 2. 2).

Tabela 2. 2 – Taxa de liberação de calor na fase de ignição (kW)

TEMPO (S)	CRESCIMENTO DO INCÊNDIO			
	LENTO	MÉDIO	RÁPIDO	ULTRARRÁPIDO.
0	0	0	0	0
60	10	43	169	677
120	42	173	677	2.707
180	94	389	1.523	6.091
240	167	691	2.707	10.829
300	261	1.080	4.230	16.920

A representação gráfica dos valores evidencia a disparidade entre os quatro casos de crescimento de incêndio proposto pela norma britânica, especialmente do caso denominado ‘Ultrarrápido’ perante os demais. (Figura 2. 3). Apesar de não utilizar a temperatura como parâmetro para caracterização do incêndio, a exemplo da curva padrão, a correlação entre taxa de liberação de calor e tempo proposta pela BS 3974/2001 é adequada na definição do arquivo de entrada dos programas de simulação computacional.

Figura 2. 3 – Gráfico da aplicação da equação 2 no intervalo inicial de cinco minutos



2.2 Segurança contra incêndio

A segurança contra incêndio corresponde ao conjunto de medidas para mitigar o risco de ocorrência do incêndio e, em caso de sinistro, minimizar as consequências decorrentes. A ocorrência de incêndios é baixa se comparada com

outros incidentes que a sociedade está cotidianamente suscetível. Mesmo em uma edificação incendiada, o risco de morte é pequeno, pois pressupõe a falha sucessiva ou ausência de vários sistemas prevenção e proteção. Segundo Silva, “pesquisas europeias mostram que o risco de morte em incêndios é 30 vezes menor do que o risco de morte no sistema de transporte” (SILVA, 2001, p. 67). Apesar do baixo risco de incidência e de óbitos, a proteção à vida deve ser entendida como prerrogativa essencial na acepção arquitetônica de SCI. Dessa maneira, a SCIE deve se afirmar como uma diretriz independente daquelas contidas no programa de necessidades listado pelo cliente.

Tendo em vista que a eliminação total do risco de ocorrência de um incêndio é uma situação utópica, a SCI objetiva estabelecer ações articuladas entre si e implementadas em todo o ciclo produtivo da edificação, objetivando a redução das perdas humanas, econômicas e sociais. A subtração de vidas humanas é certamente o pior tipo de perda decorrente de um incêndio. O número de vítimas é normalmente a primeira informação que acompanha a notícia de um incêndio e serve como um indicador de severidade. Entretanto deve-se considerar, além dos óbitos, a condição dos sobreviventes que sofrem com as mutilações, as deformidades, as doenças crônicas ou o trauma resultante do evento. Normalmente, o falecimento em momentos posteriores ao incêndio, porém em decorrência do mesmo, não são contabilizados nas estatísticas oficiais.

As perdas econômicas correspondem à destruição total ou parcial dos bens patrimoniais ou da própria edificação incendiada. A perda de matéria-prima, de mercadorias, de equipamentos e do mobiliário, bem como o custo de reconstrução predial representam um prejuízo expressivo para uma empresa, podendo leva-la à falência imediata ou nos anos seguintes. No caso de uma residência, o incêndio pode significar a destruição do maior investimento realizado pela família. Dentre os três tipos de perdas citadas, a econômica é a única que pode ser parcialmente compensada por meio da apólice de seguro. Isso explica porque os primeiros códigos de SCI, elaborados pelas companhias de seguro, preocupavam-se exclusivamente com a preservação patrimonial.

As perdas sociais correspondem aos efeitos indiretos causados por um incêndio, tais como: o desemprego gerado pelo fechamento de uma empresa cuja

sede sofreu um sinistro, ou a suspensão temporária ou permanente das atividades desenvolvidas em uma edificação incendiada. O prejuízo social também se evidencia no caso de edificações históricas ou que abrigam elementos de elevado valor histórico ou artístico da sociedade, tais como: museus, antiquários, teatros, bibliotecas ou assemelhados. A contaminação ambiental, gerada pelo incêndio ou pelos produtos utilizados no combate, também se enquadra nessa categoria. Por fim, a sensação de insegurança provocada por um incêndio configura um revés social que costuma perdurar na memória dos cidadãos locais.

Berto (1991) propõe um conjunto de oito requisitos funcionais, denominado ‘sistema global de segurança contra incêndio’, a serem atendidos pelos edifícios seguros: (1) dificultar a ocorrência do princípio de incêndio; (2) dificultar a inflamação generalizada; (3) facilitar a extinção inicial do incêndio; (4) limitar a propagação do incêndio; (5) facilitar a fuga segura dos ocupantes; (6) dificultar a propagação para os edifícios adjacentes; (7) precaução contra o colapso estrutural; (8) facilitar as operações de combate e salvamento. De acordo com o autor, esses requisitos norteiam a concepção de projetos voltados para a SCI e devem ser perseguidos “durante todas as etapas desenvolvidas no processo produtivo e uso do edifício” (op. cit., p. 11). A complexidade do tema afasta, portanto, a SCI de soluções isoladas e adotadas em um momento qualquer do desenvolvimento do projeto arquitetônico.

Por fim, é válido destacar que a eficácia do nível de segurança previsto no projeto está fortemente atrelada ao comportamento dos usuários. Quando eles desconhecem o risco de procedimentos perigosos que possam vir a ocasionar um incêndio, as medidas de segurança ficam seriamente comprometidas. O autor desse trabalho é defensor da opinião de Del Carlo (*In: SEITO [coord.], et. al., 2008*) ao afirmar que a educação da população é um instrumento imprescindível na disseminação da SCI na sociedade:

“O ideal é a implantação de programas de educação em todos os níveis de cursos, desde a pré-escola até o terceiro grau, de maneira que todos possam conhecer os riscos de incêndio de suas atividades e quais as atitudes a ser tomadas em casos de incêndios” (DEL CARLO. *In: SEITO [coord.], et. al., 2008, p. 15-16*).

2.3 Projeto arquitetônico e a segurança contra incêndio

O projeto arquitetônico pode ser compreendido como o produto de sucessivas decisões tomadas ao longo de um processo de desenvolvimento que objetiva atender um determinado programa de necessidades. Ou seja, “Projetar é buscar soluções coerentes com as condições de exposição do empreendimento e com as demandas de seus clientes, usuários e sociedade” (AsBEA, 2012, p. 13). Nesse contexto, é compreensível que quanto mais cedo o projetista assimilar os problemas apresentados, maiores são as chances de adotar soluções eficazes e economicamente viáveis.

Infelizmente ainda ocorre, na administração pública inclusive, o pensamento de que os problemas podem ser resolvidos na obra ou até mesmo após a construção do edifício. A legislação exige o projeto executivo completo⁴ para a licitação de prédios públicos. Entretanto, Silva (2015) afirma que “os prazos determinados para a elaboração dos projetos nem sempre são suficientes para o cumprimento, de forma adequada, de todas as etapas dos processos de projeção e o resultado certamente não é o esperado”. (SILVA, 2015, p. 42). Relegar a solução dos problemas projetuais às etapas de construção e ocupação implica, invariavelmente, em soluções improvisadas, onerosas e ineficientes. No setor privado, a ‘lógica de mercado’ não se afasta muito dessa situação, uma vez que é regida pelo fator financeiro e pelas oportunidades de negócio.

O arquiteto, em qualquer um dos casos, torna-se refém dos prazos impostos, podendo ser responsabilizado pela perda do recurso financeiro em decorrência de uma suposta morosidade na elaboração dos projetos. Logo, seja de modo intencional ou não, o que se observa é a ânsia pela elaboração do projeto executivo em detrimento das fases iniciais de concepção e discussão. A urgência de finalização somada à possibilidade iniciar um “novo” projeto sobre o arquivo de um projeto pregresso, favorece a repetição das soluções espaciais com pequenos ajustes formais que não alteram a essência do projeto anterior. Tal situação é um

⁴ Frequentemente emprega-se nos instrumentos legais e pareceres jurídicos o tempo ‘Projeto Básico’ para se referir ao conjunto de projetos e memoriais descritivos necessários para licitar a construção de um prédio público.

tanto inadequada do ponto de vista da SCI, pois o conjunto de variáveis envolvidas torna complexa a proposição de uma regra geral de desempenho que atenda, sem distinção, as necessidades de todos os projetos. (CAMPOS e BRAGA, 2011).

A SCI é tida internacionalmente como uma ciência e, portanto, uma área de pesquisa, desenvolvimento e ensino (DEL CARLO *In*: SEITO [coord.] et al., 2008). No Brasil ela ainda é pouco contemplada no currículo acadêmico, apesar de ser considerada como um dos requisitos básicos de desempenho das edificações (ONO, 2011). Segundo Negrisolo (2011):

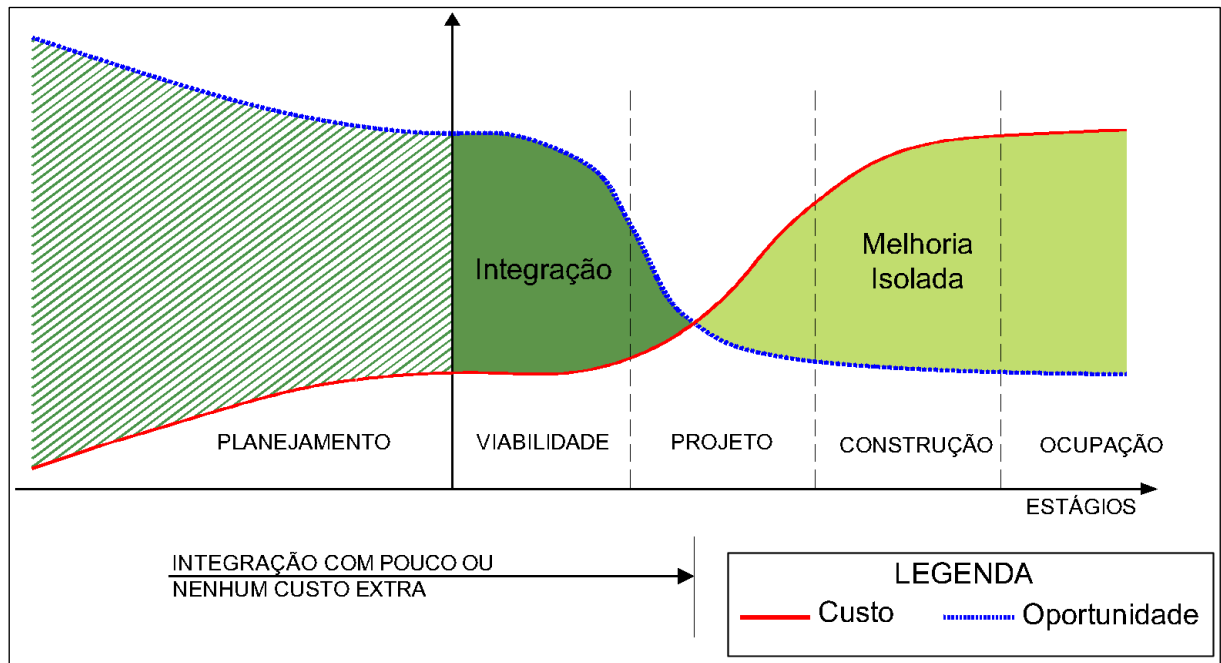
“Todos os arquitetos formados até meados da década de 70 não recebiam formação e, portanto, não possuíam sensibilidade e conhecimento que apontassem que segurança contra incêndio ultrapassasse, em muito, esse simples acrescentar de hidrantes e extintores à edificação” (NEGRISOLO, 2011, p.10).

A partir dos anos 2000, as faculdades de arquitetura notaram a deficiência na área de SCI e passaram a refletir sobre o assunto. Mas esse é um movimento que precisa continuar se expandindo. Ainda são poucos os arquitetos que consideram a SCIE no desenvolvimento do projeto (NEGRISOLO, 2011), ao invés de rebaixá-la à categoria de um mero item a ser atendido para fins de aprovação burocrática. Os engenheiros e os bombeiros despertaram para a importância da SCI nas edificações há algum tempo e é necessário que os arquitetos se insiram mais intensamente nessas discussões. O desinteresse pela SCIE, desde a formação acadêmica e durante a atividade profissional, induz a criação arquitetônica à margem do conhecimento da ciência da prevenção contra o fogo. (LUZ NETO, 1995).

A SCIE deve ser considerada, principalmente, nas etapas iniciais de projeto, pois é nessa fase que vários problemas verificados na fase de ocupação podem ser resolvidos. Essa opinião é compartilhada por Mitidieri, ao afirmar que: “grande parte da segurança contra incêndio dos edifícios é resolvida na fase de projeto. Muitas diretrizes também são, nessa fase, encaminhadas para a solução geral do problema” (MITIDIERI *In*: SEITO [coord.] et al., 2008, p. 56). As etapas iniciais do processo projetual destacam-se por oferecer uma gama maior de alternativas e, conseqüentemente, maiores possibilidades de controle por parte do autor do projeto.

Na Figura 2. 4, desenvolvida pelo *BRE Group* (2015), ilustra-se a relação inversa entre ‘oportunidade de integração’ e o ‘custo’ das decisões projetuais ao longo do processo de concepção, construção e ocupação das edificações. Fica evidente que antecipar os problemas é uma estratégia vantajosa tecnicamente e financeiramente.

Figura 2. 4 – Relação entre oportunidade de integração e custo das decisões projetuais durante o ciclo de vida de uma edificação



Fonte: BRE (2015), adaptado.

No contexto atual, a questão da segurança contra incêndio já é relacionada, inclusive, com a sustentabilidade das edificações. Diante desse cenário, soluções projetuais diferenciadas e inovadoras precisam ser incentivadas em função do desenvolvimento social, cultural, tecnológico e econômico. Dentre as três vertentes da temática segurança⁵ contempladas pela AsBEA (2012), a SCI é aquela tratada com maior ênfase pelos órgãos de normatização no cenário nacional. Percebe-se um interesse na abordagem dos aspectos relacionados ao desempenho de sistemas construtivos e dos materiais, bem como das instalações prediais.

O desempenho pode ser entendido como o comportamento adequado, em uso ou em operação, dos elementos durante todo o seu ciclo de vida, atendendo às

⁵ A AsBEA (2012) considera ainda a 'segurança no uso' focada do usuário e a 'segurança patrimonial' voltada pra aspectos físicos da edificação.

necessidades dos usuários mediante condições de exposição ao qual estarão sujeitos (AsBEA, 2012, p. 15). O interesse no desempenho dos elementos de SCIE estimula a possibilidade de propor soluções alternativas àquelas determinadas pelas regulamentações e normas vigentes. Nesses casos, as soluções alternativas devem ser estudadas tanto do ponto de vista técnico como econômico, pois elas podem ter como consequência a elevação dos custos de outras medidas (op cit., p. 46). A ABNT NBR 15575:2013 que trata das normas de desempenho das edificações, contempla a SCIE, remetendo às normas prescritivas antecedentes.

Por fim, cabe destacar que a qualidade de um projeto não pode se limitar ao mero atendimento das prescrições normativas. Melhorias e aperfeiçoamentos devem ser estimulados. De acordo com Scheer e Baranoski (2007), os profissionais das áreas de engenharia e arquitetura procuram adequar os sistemas de proteção contra incêndio das edificações com base no simples atendimento das normas de segurança em vigor. Muitos profissionais ainda consideram, equivocadamente, que os códigos proporcionam as medidas máximas de proteção, ao invés dos requisitos mínimos de segurança (VENEZIA, 2004).

Quanto as medidas de segurança a serem consideradas, o projeto arquitetônico deve considerar uma série de parâmetros de SCIE, relacionadas ao tipo de uso e ocupação da edificação, ao sistema construtivo e aos materiais de acabamento e revestimento. A segurança absoluta contra incêndio não existe. Porém, pode-se minimizar a probabilidade de ocorrência de um incêndio por meio de medidas de segurança (SILVA, 2014, p.13). As medidas de SCIE são classificadas em medidas de prevenção e de proteção, que por sua vez podem ser do tipo ativa ou passiva.

As medidas de prevenção visam reduzir a probabilidade de um incêndio iniciar-se e as de proteção buscam proteger a vida, a propriedade e a integridade da edificação caso o incêndio ocorra. A efetividade das medidas de SCIE sofre grande influência das soluções arquitetônicas e devem apresentar o desempenho previsto em projeto durante uma situação de incêndio, caso contrário, não estarão cumprindo sua função de prevenção ou proteção (ONO, 2010). “A preocupação de prevenir um incêndio deve começar na fase de elaboração do projeto de arquitetura da edificação” (GOMES, 1998, p. 2).

As medidas de proteção passiva são aquelas incorporadas à construção da edificação, que possuem, mantêm e exercem suas características permanentemente no dia a dia, agindo discretamente numa situação de incêndio. Seu objetivo é dificultar o crescimento e a propagação do incêndio; facilitando a fuga dos usuários e o ingresso dos responsáveis pelo combate e resgate de vítimas. As medidas passivas tendem a ser mais eficientes e de menor custo quando incorporadas à edificação desde as primeiras etapas do processo projetual.

As medidas de proteção passiva, diretamente relacionadas ao projeto arquitetônico, são:

- a) A compartimentação horizontal e vertical: responsável por evitar a propagação do fogo para os demais ambientes em um mesmo pavimento ou nos andares subsequentes. Por ser objeto de estudo do presente trabalho, o assunto será tratado com maior profundidade no item 2.6;
- b) A resistência ao fogo do sistema construtivo e dos materiais de acabamento: medidas relacionadas com a segurança estrutural e com a velocidade de propagação do fogo, respectivamente;
- c) O dimensionamento e sinalização das rotas de fuga: as vias de circulação, tanto as horizontais quanto as verticais, devem favorecer a evacuação da edificação de modo rápido e seguro em situações de pânico;
- d) O livre acesso das equipes de combate e salvamento: permitir a aproximação da viatura do corpo de bombeiros a qualquer parte da edificação;
- e) O controle da carga de incêndio incorporada e ocasional: quantificar a quantidade de material combustível no interior das edificações, bem como a quantidade e variedade de gases tóxicos que podem ser liberados durante a combustão;
- f) O recuo entre edificações vizinhas: evitar a propagação do incêndio entre edificações distintas.

A definição do partido arquitetônico deve incorporar as medidas de prevenção e proteção, pois praticamente todos os elementos de SCIE repercutem na composição formal da edificação. As saídas de emergência devem ser pensadas de modo integrado a forma e a funcionalidade do projeto, evitando, assim, destoarem da composição estética do edifício. A previsão de saídas de emergência

adequadas, por exemplo, devem ser planejadas logo nos primeiros esboços do projeto, pois a correção pós-construção pode se tornar impossível.

Os casos de incêndio ocorridos ao longo da história revelaram que o dimensionamento adequado das vias de circulação e a compartimentação são aspectos decisivos na salvaguarda da vida humana. O projeto arquitetônico responde diretamente por ambos os aspectos, pois é ele que determina as dimensões das vias de circulação e a área dos ambientes. Segundo Ono (2011), as medidas passivas tem papel importante na garantia da segurança contra incêndio das edificações e a efetividade destas medidas sofre grande influência das decisões arquitetônicas, principalmente àquelas que envolvem elementos intrínsecos ao projeto.

As medidas de proteção ativa são aquelas acionadas manual ou automaticamente em uma situação de emergência, e consistem, basicamente, nos sistemas de: detecção e alarmes de incêndio, iluminação de emergência, extintores portáteis, hidrantes, mangotinhos, chuveiros automáticos, dentre outros.

O projeto de arquitetura, quando bem elaborado, representa papel importante como medida preventiva e de proteção passiva em uma edificação. (ALVES; CAMPOS e BRAGA, 2008). Contudo, a falta de formação técnica e o desinteresse dos arquitetos pelo tema, somado ao *lobby* dos fabricantes de equipamentos de detecção e extinção do fogo, tende a desencorajar a adoção de medidas passivas e de baixo custo operacional no projeto arquitetônico. Consequentemente, as medidas ativas de proteção, que deveriam ser encaradas como complementares àquelas de ordem passiva, ficam responsáveis em promover, quase que integralmente, a SCIE. É importante que o arquiteto conheça o princípio de funcionamento e as potencialidades de ambos os tipos de proteção para garantir que eles sejam projetados e instalados de forma adequada (ONO, 2010, p. 15).

As soluções projetuais devem ser acompanhadas na fase de construção e ocupação, a fim de garantir que estejam sendo corretamente executadas, operacionalizadas e conservadas. Contudo, Venezia ressalta que “parte considerável dos problemas com relação à proteção contra incêndio ocorre durante a fase de operação do edifício e depende da caracterização do tipo de usuário e das

regulamentações compulsórias existentes” (VENEZIA, 2004, p. 56). Por fim, Berto afirma que “em nenhuma destas fases o problema do incêndio deve ser menosprezado, sob o risco de serem introduzidas inconveniências funcionais, dispêndios excessivos ou níveis inadequados de segurança contra incêndio” (BERTO, 1991, p. 11).

A SCIE é pautada por normas e instrumentos regulamentadores de caráter historicamente prescritivos, e podem conflitar com os outros aspectos da edificação, tais como: estético, funcional, de conforto, de privacidade e de vulnerabilidade. As normas e instrumentos regulamentadores variam de acordo com a jurisdição: municipal, estadual ou federal. O arquiteto precisa conhecer os conceitos prescritivos aplicáveis na região onde está atuando e adotá-los na definição do partido arquitetônico.

A abordagem global das questões de SCI é indubitavelmente o cenário ideal. Entretanto, levando-se em consideração a quantidade de requisitos de desempenho pertinentes ao ambiente construídos, torna-se impraticável o domínio pleno de todas as diretrizes de SCIE. Logo, constata-se a necessidade do envolvimento de uma equipe multidisciplinar para contemplar todos os pormenores de uma edificação, principalmente nos projetos de grande porte. Na impossibilidade de envolver especialistas no desenvolvimento do projeto, espera-se que o arquiteto depreenda as noções básicas e conceituais que afastem o projeto das falhas grosseiras, de difícil correção posterior e de elevado custo de manutenção.

Quando as normas e recomendações de SCI são consultadas apenas nas etapas posteriores à definição do projeto, as possibilidades de intervenções tornam-se reduzidas e onerosas. Impedido de realizar mudanças substanciais no projeto, resta ao profissional responsável pela SCI a implantação e o dimensionamento dos sistemas complementares como uma forma de compensação de risco. Ou seja, a solução recai sobre ‘o que ainda é possível ser feito’, ao invés de se trabalhar com ‘o que é melhor, mais eficaz e mais viável’.

O aspecto financeiro é inegavelmente preponderante nas decisões projetuais. Portanto é necessário estabelecer um equilíbrio entre o custo e os prováveis benefícios, tendo em vista que nem sempre o gasto excessivo resulta

necessariamente em melhorias significativas das condições de SCIE. Sobre esse assunto, Berto (1991) faz a seguinte exposição:

“As medidas de prevenção e de proteção contra incêndio devem ser selecionadas e conjugadas não somente com o sentido de estabelecer a devida contraposição aos riscos, mas também, visando alcançar um adequado balanço entre custos e benefícios e a preservação da perfeita funcionalidade do edifício” (BERTO, 1991, p. 25).

2.4 Controle de fumaça

A fumaça é a mistura de gases, vapores e partículas sólidas finamente divididas, de composição química bastante complexa e resultante da queima dos elementos combustíveis participantes do incêndio. A fumaça é facilmente identificada tanto visualmente quanto pelo odor e acomete os ocupantes por ocasião do abandono da edificação. A desorientação e o pânico decorrente da redução da visibilidade, bem como os céleres danos causados ao organismo, são os principais malefícios associados à fumaça.

A elevada temperatura favorece o deslocamento da fumaça por convecção em todo o ambiente incendiado e sua dispersão através do fosso de serviço, dos dutos, das frestas, das aberturas e dos vãos dispostos, principalmente, próximos ao teto. Apesar de concentrar-se inicialmente na porção superior, a fumaça tende a ocupar todo o recinto, reduzindo gradativamente o ar disponível para a respiração dos ocupantes. A redução da camada livre de fumaça é acentuada em ambientes desprovidos de aberturas ou que apresentem exaustão deficiente.

A emissão de fumaça pode ser medida por métodos gravimétricos ou ópticos. O método gravimétrico baseia-se na determinação padronizada da massa das partículas de fumaça depositadas sobre um filtro. O método óptico afere o obscurecimento, ou seja, a fração de luz absorvida ou obstruída pela fumaça (GALLO e AGNELLI, 1998).

Ensaio laboratoriais permitiram o desenvolvimento de expressões matemáticas, baseadas nas Leis de Lamberts-Beer⁶, para quantificar o obscurecimento da luz devido a fumaça. Contudo, soa mais adequado à elaboração de um projeto de SCI a indicação subjetiva de densidade de fumaça, que caracteriza o risco em função da distância que uma pessoa pode enxergar em uma situação de incêndio. Segundo Seito:

“A visibilidade mínima aceitável para as rotas de fuga é de 5 m, ou seja, corresponde a densidade ótica por metro de 0,2. Para atingir este valor a fumaça original do incêndio precisa ser diluída 50 vezes seu próprio volume com ar isento de fumaça.” (In: SEITO [coord.] et al, 2008, p. 51).

Enquanto que o obscurecimento prejudica essencialmente o deslocamento ordenado dos ocupantes em busca das rotas de fuga, a toxidade é, indubitavelmente, a propriedade mais ofensiva da fumaça. A composição da fumaça sofre influência de fatores como: tipo e quantidade dos materiais em combustão, temperatura, disponibilidade de oxigênio e nível de energia [calor] envolvido no processo. A quantidade de variáveis envolvidas faz com que cada sinistro gere diferentes composições da fumaça, a qual varia, inclusive, em função do estágio de desenvolvimento do incêndio. Seito (op. cit.) cita que algo em torno de duas centenas de substâncias pode fazer parte da composição da fumaça, sendo as mais frequentes:

- a) Monóxido de carbono [CO];
- b) Dióxido de Carbono [CO_2];
- c) Gás cianídrico [HCN];
- d) Gás Clorídrico [HCl];
- e) Óxidos nitrosos [NO_x];
- f) Gás sulfídrico [H_2S];

De forma resumida, essas e outras substâncias contidas na fumaça atacam severamente o aparelho respiratório e provocam irritação nas mucosas. O monóxido de carbono, o gás cianídrico e o gás sulfídrico são especialmente letais, mesmo em

⁶ As Leis de Lamberts-Beer, descritas na segunda metade do séc. XIX, relacionam a absorção de luz com a concentração e espessura do material atravessado.

pequenas concentrações, por interferirem no processo de oxigenação das células. A concentração das substâncias presentes na fumaça ar é aferida pela grandeza denominada índice de toxicidade.

O interesse no controle de fumaça como instrumento de SCIE teve início a partir da segunda metade do século XX, instigada por incêndios ocorridos em fábricas de automóveis na América do Norte e na Inglaterra (CUNHA; MARTINELLI JR. *In*: SEITO [coord.] et al., 2008). O principal objetivo dos primeiros sistemas de controle de fumaça era a proteção do patrimônio e a continuidade das atividades produtivas, evitando, assim, a eminente falência das empresas acometidas por um incêndio. A partir da década de 1970, com o advento dos *shoppings centers*, passou-se a aplicar o controle de fumaça também em edificações com grande aglomeração de pessoas.

O funcionamento do sistema de controle de fumaça baseia-se em dois princípios: ventilação natural de extração e ventilação monitorada. O primeiro caso consiste em uma medida passiva, na qual a exaustão da fumaça ocorre por aberturas dispostas no teto e é impulsionada pela flutuabilidade dos gases aquecidos e pelo gradiente de pressão de vento sobre a envoltória. A ventilação monitorada é um sistema ativo, que faz uso de equipamentos eletromecânicos para forçar a extração da fumaça.

Cada sistema apresenta as vantagens e as desvantagens características das medidas de proteção ativa e passiva, tais como: a integração com projeto arquitetônico, os custos de implantação e operação e a necessidade de manutenção e monitoramento regulares. Independentemente do princípio de funcionamento, o sistema de controle de fumaça deve dispor de: aberturas ou exaustores no nível do teto para a saída da fumaça, barreiras de fumaça para restringir a dispersão e meios de admissão de ar limpo para a reposição do volume extraído. O objetivo principal é impedir o acúmulo de fumaça dentro da edificação, bem como garantir uma camada visível com altura suficiente para que os ocupantes em fuga se orientem e as equipes de combate consigam aproximar-se das chamas.

A Instrução Técnica nº 15-1/2011 (CBPMESP, 2011) conceitua de forma bastante prática que “o controle de fumaça é obtido pela introdução de ar limpo e

pela extração de fumaça” (Op. cit., p. 3) e estabelece três condições para que o controle de fumaça seja obtido de modo eficiente: a divisão dos volumes de fumaça, a inexistência de zonas mortas e o controle das aberturas de ventilação e exaustão para permitir um diferencial de pressão. É facultado ao projetista utilizar tanto a forma natural quanto mecânica para os sistemas de introdução e extração de fumaça. Porém, ao optar pela introdução de ar mecânica, a extração não pode ocorrer de forma natural.

A IT 15-1/2011 estabelece também uma série de cuidados que devem ser tomados no dimensionamento, operação e manutenção dos sistemas de controle de fumaça. Sempre seguindo a lógica de que o sistema deve funcionar de tal maneira que a área sinistrada seja colocada em pressão inferior às áreas adjacentes. A instrução paulista recomenda que o sistema de controle de fumaça, seja ele de acionamento manual ou automático, deve entrar em operação logo no início da formação da fumaça. Nesse sentido, é importante que haja sincronismo entre a admissão de ar e a exaustão de fumaça para evitar uma explosão provocada por um desequilíbrio acentuado de pressão no sistema.

Considerando a linha de pensamento adotada no presente trabalho, de que cabe ao arquiteto favorecer a implantação de sistemas passivos, torna-se prudente destacar o que as normas recomendam para o controle de fumaça nesse sentido. A IT 15-3/2011 (CBPMESP, 2011), que trata dos parâmetros a serem adotados na elaboração de um projeto de controle de fumaça com extração natural, estabelece que a área máxima de acantonamento seja de 1600,00 m² e o comprimento máximo de 60,0 m. A extração de fumaça pode ser realizada por aberturas nas fachadas, por exaustores naturais ou por aberturas de extração. Contudo, deve ser assegurada a distância mínima de 4,0 m entre a abertura de descarga de fumaça e a divisa do terreno ou a propriedade adjacente.

2.5 Normatização

“A compreensão abrangente das questões expostas nas regulamentações deve levar a soluções de projeto mais eficientes em relação à segurança” (AsBEA, 2012, p.43). As primeiras regulamentações de segurança contra incêndio foram formuladas pelas empresas de seguros com o restrito, porém compreensível,

interesse na proteção do patrimônio. Apesar de conceitualmente absurda nos dias atuais, essas regulamentações foram, por muito tempo, adotadas pelo Corpo de Bombeiros de diversos países, inclusive no Brasil.

A mudança de paradigma, em que o foco da SCI sai da proteção do patrimônio e volta-se para a preservação da vida, ocorreu tempestivamente em cada país após casos de incêndio com grande quantidade de vítimas. Enquanto que nos Estados Unidos da América os incêndios ocorridos no início do século XX fomentaram a mudança do enfoque da regulamentação a partir de 1911, no Brasil as discussões e propostas começam a despontar em meados da década de 1970, após os casos de incêndio em edifícios verticais na cidade de São Paulo/ SP. Até então, no Brasil o incêndio era um ‘problema’ que dizia mais respeito ao Corpo de Bombeiros. As regulamentações existentes eram espaciais e sem qualquer incorporação do aprendizado dos incêndios ocorridos no exterior (NEGRISOLO, 2011).

A percepção de que os grandes incêndios com vítimas, até então distantes, podem se transformar em fatos reais despertou a exigência por mudanças na abordagem da SCI. Atentou-se “para a diferença entre ter seguro contra incêndio e segurança contra incêndio” (GOMES, 1998, p. 2). Poucos dias após o incêndio no edifício Joelma, a Prefeitura da Cidade de São Paulo publicou Decreto Municipal nº 10.878, que viria a se tornar Lei Municipal no ano seguinte, contendo normas a serem observadas na elaboração do projeto para a segurança dos edifícios. O aparente imediatismo na publicação do Decreto reflete, de fato, a retomada dos estudos iniciados dois anos antes, incitado pelo incêndio ocorrido no edifício Andraus, também na cidade de São Paulo/ SP, mas que foram arquivados diante do desinteresse público após o ímpeto inicial.

Quatro meses após o caso do edifício Joelma, a Câmara dos Deputados Federais, por intermédio da Comissão Especial de Poluição Ambiental, promoveu o ‘Simpósio de Sistemas de Prevenção contra Incêndios em Edificações Urbanas’. No ano seguinte, o Governo do Estado do Rio de Janeiro apresentou o Decreto-Lei 247, dispondo sobre Segurança Contra Incêndio e Pânico, regulamentado em 1976.

Simultaneamente a essas primeiras ações dos poderes Legislativo e Executivo, o meio técnico, em especial os engenheiros civis, passam a discutir o tema, estimulados por eventos promovidos pelas entidades de classe. Destaca-se pelo pioneirismo O ‘Simpósio de Segurança Contra Incêndio’, promovido pelo Clube de Engenharia do Rio de Janeiro em meados de março de 1974, ou seja, menos de dois meses após o incêndio do edifício Joelma. No mesmo ano, a Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] publicou a NB 208/74, dispondo sobre as saídas de emergência em edifícios altos, que posteriormente viria a se transformar na ABNT NBR 9077:2001. No ano de 1975 foi criado o Laboratório de Ensaio do Fogo, dentro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado [IPT], em São Paulo/SP. Em meio a toda a movimentação em entorno da SCI observada na década de 1970, o Ministério do Trabalho editou, em 1978, a Norma Regulamentadora 23 [NR-23], que estabelece as regras de proteção contra incêndios na relação empregado/empregador.

O meio acadêmico também concebia a mudança de paradigma, a exemplo do trabalho de doutorado concluído pelo professor Teodoro Rosso em 1975, na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo [FAUUSP], que abordava a integração da SCI ao projeto no ensino da graduação em arquitetura. Após o falecimento do professor Rosso, as pesquisas acadêmicas sobre o tema foram descontinuadas. A retomada ocorreu a partir da década de 1990, com a formação de mestres e doutores na área de SCIE, na FAUUSP (ONO, 2010).

Apesar do atraso em relação ao contexto internacional, constata-se uma contínua produção e revisão dos instrumentos normativos no Brasil a partir da década de 1970. Entretanto, a ausência de uma referência federal contribui para a ausência de uniformidade das medidas de SCI adotadas na legislação de cada estado. A elaboração ou a revisão de normas técnicas requer um tempo de dedicação e discussão entre os representantes da sociedade, num processo que tende a se tornar excessivamente longo. Essa letargia burocrática ocasiona um descompasso entre a produção de normas contendo parâmetros de qualidade para o projeto arquitetônico e os processos de produção do espaço, da tecnologia de materiais e sistemas construtivos. (SILVA, 2015)

Conforme exposto, o surgimento de normas e instrumentos regulamentadores tende a ser incitado pela ocorrência de incêndios de grande proporção, resultando em uma legislação produzida com base nas dificuldades encontradas pelas equipes de combate e resgate. Apesar da urgência evocada pelos casos de grande comoção nacional, é indispensável a participação das categorias envolvidas diretamente nesse processo, em especial os arquitetos e os engenheiros, para que opinem ou tomem conhecimento das implicações nos seus projetos. (SILVA, 2015). “Muitas vezes, as necessidades da comunidade técnica não são rapidamente atendidas, gerando conflitos que podem ter como consequência perdas econômicas” (COSTA, ONO e SILVA, 2005, p. 2).

Basear a proposição ou a atualização de normas em eventos pregressos é um método válido, mas com ao menos uma característica indesejável: precisa que um incêndio ocorra para que as informações necessárias sejam geradas. Uma alternativa é o uso de ensaios laboratoriais para a geração de dados que fomentem os estudos na área. No Brasil, os ensaios de incêndio em modelos na escala real são realizados com pouca frequência, por se tratar de uma situação perigosa, dispendiosa e específica. A escassez, ou a dificuldade em obtenção, de dados para subsidiar soluções inovadoras desestimula a pesquisa na área de SCIE. Tal situação implica na concepção e perduração de medidas prescritivas e empíricas⁷ de SCIE.

No contexto atual, a preocupação com a SCIE no projeto arquitetônico recai, impreterivelmente, na aplicação das normas e regulamentações. O exame das normas vigentes pertinentes ao projeto arquitetônico (Tabela 2. 3) revela a ênfase dada às propriedades físicas dos materiais, sem necessariamente buscar soluções compatíveis com os aspectos estético e funcional da edificação.

⁷ De acordo com Silva (2014) os “métodos prescritivos são aqueles que nem sempre têm rigorosa comprovação científica, mas são consagrados em normas ou regulamentos” (SILVA, 2014, p.107).

Tabela 2. 3 – Caracterização das principais normas vigentes

NORMA	TÍTULO	ENFOQUE
ABNT NBR 5627:1980	Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo – Procedimento	Estrutura
ABNT NBR 9077:2001	Saídas de emergência em edifícios	Dimensionamento de rodas de fuga
ABNT NBR 9441:1998	Execução de sistemas de detecção e alarme	Instalações prediais
ABNT NBR 9442:1986	Materiais de construção – Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante – método de ensaio	Propriedade dos materiais
ABNT NBR 10636:1989	Paredes e divisórias sem função estrutural – determinação da resistência ao fogo – método de ensaio	Propriedade dos materiais
ABNT NBR 10897:2004	Proteção contra incêndio por chuveiro automático – Procedimento	Instalações prediais
ABNT NBR 10898:1999	Sistema de iluminação de emergência	Instalações prediais
ABNT NBR 11742:2003	Porta corta-fogo para saídas de emergência – Especificações	Propriedade dos materiais
ABNT NBR 11785:1992	Barra antipânico - Especificações	Propriedade dos materiais
ABNT NBR 12693:1993	Sistemas de proteção por extintores de incêndio	Equipamentos
ABNT NBR 13434-2:2004	Sinalização de segurança contra incêndio e pânico	Comunicação Visual
ABNT NBR 13714:2000	Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio	Instalações prediais
ABNT NBR 13860:1997	Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio	Definições
ABNT NBR 14100:1998	Proteção contra incêndio – Símbolos gráficos para projeto	Comunicação visual
ABNT NBR 14432:2001	Exigência de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimentos	Propriedade dos materiais

A histórica omissão dos arquitetos e dos seus órgãos representativos resultou no cenário atual, onde a produção de conhecimento na área de SCIE restringe-se, quase que completamente, ao campo da engenharia. A escassez de estudos de referência na área de arquitetura dificulta a adoção de soluções projetuais flexíveis às especificidades de cada projeto e reforça as técnicas tradicionais e conservadoras utilizadas pelos especialistas. As inovações tecnológicas de SCIE seguem timidamente, desestimuladas pela falta de um mercado instigador. Nesse contexto, Ono (2010, p. 6) defende que “a difusão do

conhecimento da segurança contra incêndio nos cursos de graduação de arquitetura torna-se um fator importante para o avanço na área e uma elevação da qualidade do projeto”.

O desenvolvimento tecnológico proporcionou notória modificação nos sistemas construtivos, estruturais e projetuais. São características dos projetos contemporâneos: grandes vãos isentos de compartimentação, elementos de vedação e de fachada formado por materiais leves e delgados, e a acentuada incorporação de materiais combustíveis aos elementos construtivos ou estruturais. Tais modificações, aliadas ao número crescente de instalações e equipamentos de serviço, introduzem riscos que anteriormente não existiam nas edificações. Depreende-se, então, a necessidade de uma constante revisão dos procedimentos aplicados nas áreas de construção, para que se tenha maior confiabilidade nos novos parâmetros. (VENEZIA, 2004).

Há uma tendência mundial em seguir recomendações com base no desempenho, em complementação às normas prescritivas, pois elas permitem aos projetistas e construtores adotar soluções próprias para alcançar os resultados requeridos (ONO, 2011; e CAMPOS e BRAGA, 2011). As normas de desempenho são estabelecidas com base nas respostas que um produto deve apresentar, independentemente dos seus materiais constituintes e do processo de produção. Normas assim elaboradas visam tanto incentivar e balizar o desenvolvimento de produtos, quanto orientar a avaliação da real eficiência técnica e econômica das inovações tecnológicas.

Uma legislação moderna deve considerar outras ferramentas, além dos ensaios experimentais ou dos sinistros pregressos, na obtenção de dados para subsidiar a classificação do desempenho dos elementos de uma edificação. Silva cita que “nos países desenvolvidos são bastante estudados métodos cientificamente avançados que utilizam programas de computador” (SILVA, 2014, p. 107). Contudo, é necessário prudência e prévio conhecimento dos métodos prescritivos para que seja realizada uma análise criteriosa dos resultados gerados nas simulações computacionais.

2.6 Compartimentação

As características físicas e tipológicas dos edifícios são determinantes para a segurança contra incêndio (SANTOS, 2010). O confinamento do incêndio, preferencialmente em seu estado inicial, no menor espaço possível é, a princípio, a melhor estratégia para limitar seu crescimento e propagação para os demais cômodos da edificação (VASCONCELOS, 2008). A compartimentação é uma medida de proteção passiva determinante na segurança contra incêndio e consiste em dividir a edificação em células resistentes à propagação do fogo. O confinamento do incêndio restringe a livre movimentação da fumaça e dos gases no interior da edificação, facilitando o abandono seguro dos ocupantes e contribuindo nas operações de combate ao fogo. Diferentemente do controle da carga de incêndio, a compartimentação é uma medida de grande controle por parte do arquiteto.

No Brasil, a definição de compartimentação pode ser obtida em instrumentos normativos. A ABNT NBR 13860:1997 distingue a compartimentação em horizontal e vertical, onde a primeira é definida pela “subdivisão de pavimento em duas ou mais unidades autônomas, executada por meio de paredes e portas resistentes ao fogo, objetivando dificultar a propagação do fogo e facilitar a retirada de pessoas e bens” (op. cit., p. 4). A segunda é definida como sendo o “conjunto de medidas de proteção contra incêndios que tem por finalidade evitar a propagação de fogo, fumaça ou gases de um pavimento para outro, interna ou externamente” (op. cit., p. 4). Por sua vez, a ABNT NBR 14432:2001 define compartimento como sendo a “edificação ou parte dela, compreendendo um ou mais cômodos, espaços ou pavimentos, construídos para evitar a propagação do incêndio de dentro para fora de seus limites, incluindo a propagação entre edifícios adjacentes, quando aplicável” (op. cit., p. 2). Percebe-se, portanto que as definições trazidas pelas normas brasileiras possuem um caráter genérico, pois expõem a necessidade de implantação, mas não apresentam valores propriamente ditos.

Considerando a experiência e vanguarda do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo [CBPMESP] na publicação de instrumentos normativos, os quais são frequentemente adotados parcialmente ou na íntegra pelo Corpo de Bombeiros dos demais estados do país, torna-se oportuno observar a definição de compartimentação dada pela Instrução Técnica nº 03 - IT 03/ 2004, que

trata da 'Terminologia de Segurança contra Incêndio'. De acordo com o documento, a compartimentação é expressa por:

“Medidas de proteção passiva, constituídas de elementos de construção resistentes ao fogo, destinadas a evitar ou minimizar a propagação do fogo, calor e gases, interna ou externamente ao edifício, no mesmo pavimento ou para pavimentos elevados consecutivos” (CBPMESP, 2004, p. 7).

O conceito básico de compartimentação é concordante na bibliografia pesquisada, com alguns pormenores nas definições complementares. Com base em um levantamento da literatura internacional, Costa; Ono e Silva (2005) descreveram as nuances do conceito de compartimentação. Segue um breve resumo dos dados levantados pelos autores:

- a) A *National Fire Protection Association Handbook* [publicação da entidade norte-americana NFPA] apresenta um conceito mais abrangente quanto à compartimentação, definindo-a como qualquer barreira que impede ou limita a propagação das chamas de um ambiente para outros adjacentes. Contudo, faz uma ressalva a respeito da perda da sua função na presença de qualquer fenda ou abertura desprotegida. O manual faz uma observação quanto ao TRRF em função do objetivo da compartimentação. Quando se deseja isolar o ambiente, independentemente de qualquer ação de combate, a barreira deve suportar o incêndio durante todo o período de queima do material combustível, até o resfriamento. Entretanto, se o objetivo é apenas assegurar a desocupação da edificação e o acesso da equipe de combate, o TRRF pode ser reduzido significativamente a um período compatível com tais eventos;
- b) A *International Building Code* – IBC 2000 apresenta definições bem mais pragmáticas para a compartimentação e seus elementos. A notória similaridade entre os conceitos apresentados pelo IBC 2000 e as normas brasileira instiga-nos a acreditar que esse documento costuma servir de base para a elaboração das normas nacionais.
- c) A *International Standardization Organization* – ISO, por meio da EN ISO 13943:2000: *Fire safety – Vocabulary*, atem-se a definir compartimentação e seus elementos constituintes, sem explorar os valores de referência ou especificações de materiais.

Marcatti; Berquó Filho e Coelho Filho (*In*: SEITO [coord.] et al., 2008) apresentam as particularidades do conceito de compartimentação trazidas pelas normas francesa e inglesa:

- d) O regulamento francês apresenta no artigo CO 21 – ‘*Résistance à la propagation verticale du feu par les façades comportant des baies*’ as equações que permitem combinar as dimensões dos elementos de fachada para assegurar a compartimentação externa do ambiente. De forma resumida, a soma mínima das dimensões do parapeito e da marquise sob uma esquadria varia de 1,00m a 1,30m em função da carga de incêndio do compartimento;
- e) O regulamento inglês *The Building Regulations 2000 Fire Safety* diferencia a compartimentação em formas convencionais e especiais. As formas espaciais se aplicam aos seguintes casos: edifícios distintos que compartilham uma parede em comum, edifício dividido em partes independentes, edificações com especial risco de incêndio e garagens.

2.6.1 Elementos de compartimentação.

A compartimentação é obtida por meio de elementos construtivos resistentes ao fogo. Venezia (2004) alerta que a denominação ‘à prova de fogo’ deve ser evitada, uma vez que todos os materiais sofrem alterações de acordo com a intensidade e período ao qual são submetidos à incidência do fogo. O conceito de resistente ao fogo, ou ‘corta-fogo’, aplica-se àqueles materiais que mantêm as características de integridade, estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico durante um período pré-determinado quando submetidos à elevação padronizada de temperatura. Sua função é impedir a livre propagação do fogo e da fumaça, confinando o incêndio em seu ambiente de origem, permitindo a desocupação da edificação e facilitando as operações de combate e salvamento.

A ABNT NBR 14432:2001 apresenta os conceitos de estanqueidade e isolamento: o primeiro refere-se a “capacidade de um elemento construtivo impedir a ocorrência de rachaduras ou aberturas, através das quais possam passar chamas e gases quentes capazes de ignizar um chumaço de algodão” (op. cit., p. 3). Isolamento, por sua vez, é a “capacidade de um elemento construtivo de impedir a

ocorrência, na face que não está exposta ao incêndio, de incrementos de temperatura maiores que 140 °C na média dos pontos de medida ou maiores que 180 °C em qualquer ponto de medida” (op. cit., p. 3). A parede corta-fogo, além de atender os requisitos mencionados, precisa ser construída de piso a teto e estar fortemente vinculada à estrutura da edificação por meio de elementos reforçados. Caso a cobertura seja composta por elementos combustíveis, a parede corta-fogo deve estender-se por ao menos um metro acima do limite da cobertura.

Paredes e portas corta-fogo também são empregados no enclausuramento das escadas protegidas, as quais podem ser antecedidas por antecâmaras providas dos mesmos dispositivos. No caso dos elevadores, utilizam-se portas do tipo para-chama, que precisam permanecer fechadas mesmo quando os comandos elétricos de abertura forem danificados pelo calor. As portas para-chama podem ser dispensadas se o acesso ao elevador ocorrer por meio da antecâmara da escada. Recomendações semelhantes se aplicam ao monta-cargas.

Os dutos e as tubulações que atravessam os entrepisos devem ser envolvidos por selos corta-fogo que garantam a vedação total da abertura destinada à passagem dos tubos, impedindo a comunicação entre pavimentos. Para os dutos de ventilação e de ar-condicionado, faz-se necessário, também, a instalações de registros corta-fogo na transposição dos entrepisos. Os átrios comprometem a compartimentação da edificação e devem, portanto, atender condições que dificultem a propagação do incêndio, tais como a instalação de chuveiros automáticos e cortinas para-chamas automatizadas.

A ausência de elementos horizontais ou verticais de compartimentação transforma toda a edificação em um único compartimento na ocorrência de um incêndio. A certificação da compartimentação é obtida, portanto, pela verificação da presença dos elementos de segurança e o respectivo TRRF específico. As regulamentações não contemplam níveis intermediários de compartimentação, uma vez que a ausência de um dos itens descritos anteriormente já é suficiente para caracterizar o ambiente como não compartimentado.

2.6.2 Classificação espacial da compartimentação.

A compartimentação horizontal consiste em confinar o incêndio em seu ambiente de origem, sem atingir os espaços circunvizinhos de um mesmo pavimento. A compartimentação vertical visa isolar cada andar dos demais, de modo a confinar o incêndio em seu pavimento de origem. A estrutura e a compartimentação vertical são as medidas de SCI mais importantes em edifícios elevados (NEGRISOLO, 2013). Logo, a atenção é direcionada para os entresijos e as respectivas aberturas ou descontinuidades. Ambas as formas de compartimentação podem ainda ser subclassificadas como interna ou externa, em referência ao confinamento ocorrer dentro da edificação ou na fachada, respectivamente.

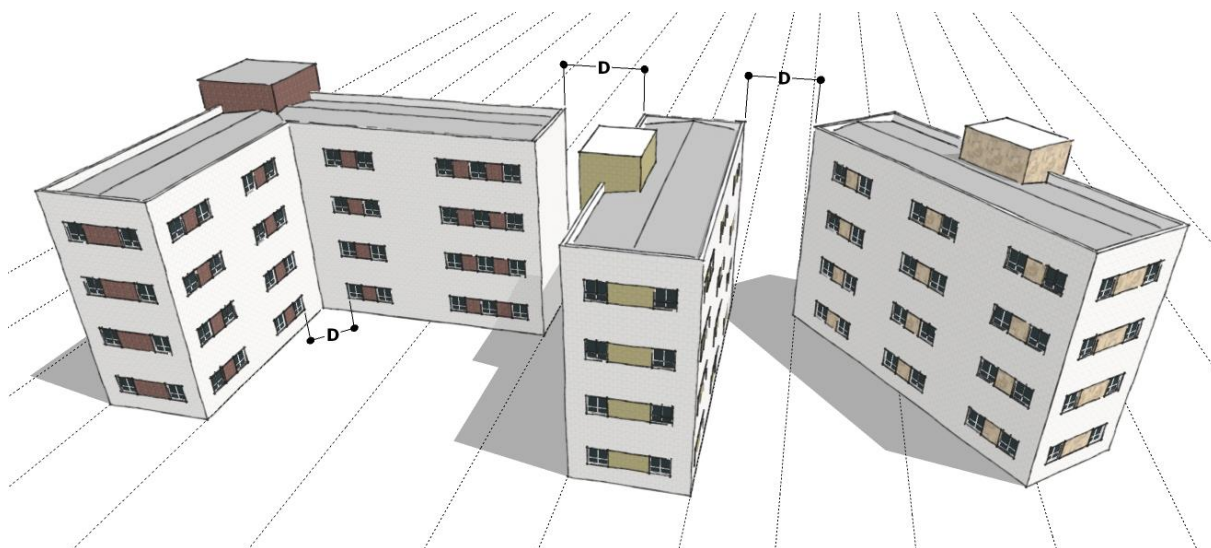
A compartimentação externa é fortemente influenciada pelos elementos estético-funcionais que compõem a envoltória. Edificações que fazem uso de sistemas construtivos não tradicionais representam em uma fonte inesgotável de estudo, a exemplo de Direito (2011) que, ao estudar a SCI em fachadas envidraçadas e termicamente isoladas para o clima europeu, concluiu que a lã de rocha apresenta desempenho superior ao poliuretano expandido no isolamento das pontes térmicas.

A Instrução Técnica nº 09 – IT 09/ 2011 (CBPMESP, 2011) apresenta de forma bastante didática os valores mínimos ou recomendados para o dimensionamento do compartimento a ser adotados no projeto arquitetônico. Resumidamente, a IT 09/ 2011 recomenda:

- a) Quanto à compartimentação horizontal externa: as aberturas na mesma fachada, porém em lados opostos da parede de compartimentação, devem ser afastadas horizontalmente entre si por trecho de parede com dois metros de extensão, devidamente consolidada à parede de compartimentação e apresentando a mesma resistência ao fogo. Esta distância pode ser substituída por um prolongamento, externo à edificação, da parede de compartimentação com extensão mínima de noventa centímetros. No caso de fachadas ortogonais, paralelas ou não coincidentes (Figura 2. 5), a distância

mínima entre as aberturas de ambientes compartimentados é dada pela Tabela 2. 4.

Figura 2. 5 – Distância mínima (D) entre aberturas de ambientes compartimentados: em fachadas ortogonais, paralelas e não coincidentes.



Fonte: IT 09/ 2011 (CBPMESP, 2011), adaptado.

Tabela 2. 4 – Distância mínima entre aberturas de ambientes compartimentados

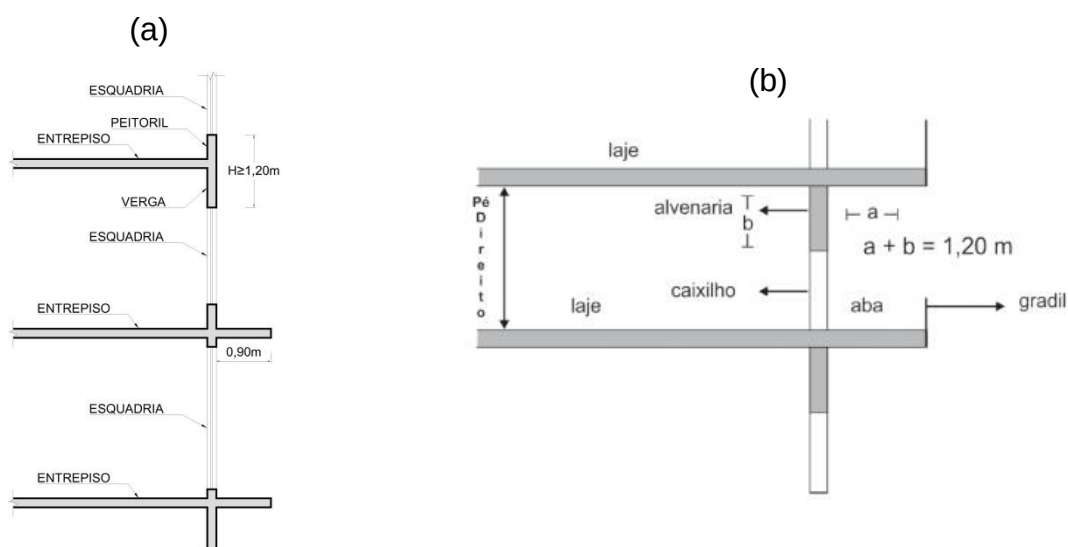
Porcentagem de abertura de toda fachada (%)	Distância de compartimentação "D" (m)
Até 20	4
De 21 a 30	5
De 31 a 40	6
De 41 a 50	7
De 51 a 60	8
De 61 a 70	9
Acima de 70	10

Fonte: IT 09/ 2011 (CBPMESP, 2011).

- b) Quanto à compartimentação vertical externa: é obtida por meio de elementos que dificultem a passagem do fogo entre as aberturas de pavimentos consecutivos. A distância mínima entre o topo da abertura do pavimento inferior e a base da abertura do pavimento superior não pode ser menor do que 1,20 m. Esse valor pode ser desconsiderado caso haja a projeção maior ou igual a 0,90 m da laje de entrepiso (Figura 2. 6a). Caso opte-se por um

sistema misto de abas verticais e horizontais, a soma deve ter no mínimo 1,20 m (Figura 2. 6b). Atenção especial deve ser dada às fachadas envidraçadas, que devem ser vedadas por selos corta-fogo nas frestas.

Figura 2. 6 – Dimensionamento dos elementos de compartimentação vertical externa



Fonte: IT 09/ 2011 (CBPMESP, 2011)

- c) Quanto à compartimentação horizontal interna: é resultado da adoção de paredes corta-fogo e, quando necessário, de demais elementos da mesma categoria, tais como: portas, selos e registros. O TRRF é sempre superior a 30 minutos, podendo chegar a 180 minutos em casos específicos, conforme prescrito na IT 08/ 2010 (CBPMESP, 2010). A área máxima de compartimentação varia em função do uso e da altura da edificação e estão devidamente descritas na IT 09/ 2011, Anexo B (CBPMESP, 2011). De modo geral, a área máxima de compartimentação tende a ser menor em edificações altas, com grande quantidade de ocupantes e nos usos que apresentam maior risco de incêndio. A revisão da IT 09/ 2011, disponibilizada para consulta pública em 2015, propõe o valor de 2000,00 m² como área máxima de compartimentação para edificações escolares com altura superior a 23,0 m, categoria que até então era isenta de parâmetros nesse aspecto. Por fim, a IT 09/ 2011 classifica as salas de aulas, dentre outros casos especiais, como unidades autônomas, para as quais “as paredes divisórias entre unidades autônomas e entre unidades e as áreas comuns, (...) devem possuir

requisitos mínimos de resistência ao fogo, de acordo com o prescrito na IT 08/2010” (CBPMESP, 2011, p. 5).

- d) Quanto à compartimentação vertical interna: é representada, principalmente, pelo entrepiso corta-fogo. Contudo, quando esse elemento precisa ser descontinuado para a passagem dos sistemas de instalação predial, é necessário o emprego de selos, registros e vedadores tipo corta-fogo para garantir o confinamento do incêndio no pavimento de origem. A proteção dos *shafts* e das caixas de escada ou elevador merece atenção, uma vez que são espaços naturalmente desprovidos de barreiras horizontais e, por isso, podem permitir a livre propagação do incêndio ao longo de vários pavimentos consecutivos.

Além da classificação tradicional, outros autores apresentam entendimentos complementares ao conceito de compartimentação. Malhotra (1993, apud COSTA; ONO e SILVA, 2005) propõe uma classificação da compartimentação em dois tipos, as quais ele denominou de ‘essencial’ e ‘de controle’. A primeira consiste em estabelecer áreas específicas permanentemente isoladas, capazes de impedir que o incêndio se alastre para áreas adjacentes. Enquadram-se nesta categoria as rotas de fuga, os *shafts*, as escadas enclausuradas, os dutos de ventilação e os forros. A compartimentação de controle, por sua vez, trata da limitação do incêndio objetivando reduzir os riscos dos usuários e facilitar as ações de combate ao fogo. O autor também sugere a adição de compartimentos de diferentes tamanhos quando a proteção do patrimônio é relevante. Todavia, não cita os critérios das subdivisões, recomendando que o projetista consulte as seguradoras para tal fim.

2.6.3 Falhas nos sistemas de compartimentação

As falhas nos sistemas de compartimentação podem ser agrupadas em três categorias: precoce, aleatória ou decorrente da degradação do material. As falhas precoces surgem, principalmente, da falta de manutenção ou de vícios operacionais como, por exemplo, o mau uso ou má conservação das portas corta-fogo. As falhas aleatórias são normalmente atribuídas a erros de execução ou, até mesmo, a falhas de projeto ainda não reconhecidas pelos métodos de ensaio e de cálculo. Por fim, as falhas decorrentes da degradação material estão relacionadas ao não

funcionamento dos equipamentos eletrônicos e mecânicos em função da deterioração natural ou ocasional dos mecanismos internos.

Merece atenção os espaços não visíveis da edificação por onde o fogo pode se propagar para ambientes adjacentes sem que seja percebido pelos ocupantes ou até mesmo pelos sistemas de detecção ativa. Enquadram-se nesta categoria os forros e pisos falsos, os *shafts*, os dutos e tubulações e as juntas de dilatação. A princípio, a chama e os subprodutos do incêndio conduzidos através desses espaços tendem a não ser tão nocivos se comparados com a livre propagação do fogo, em função da resistência natural ao fluxo imposta pelo estrangulamento. Contudo, a carga de incêndio presente nesses espaços, especialmente aquelas de finalidade elétrica e de isolamento termoacústico, podem tornar os espaços escondidos em vias de livre acesso aos demais ambientes da edificação, comprometendo significativamente a compartimentação.

Se as frestas e passagens ocultas representam pontos de fragilidade, as esquadrias e as aberturas são, obviamente, as partes mais vulneráveis de um sistema de compartimentação. Logo, a proteção desses elementos exige cuidados específicos tendo em vista as funções de evacuação e de acesso da equipe de combate a incêndio naturalmente associados às esquadrias. Quanto ao dimensionamento, Costa, Ono e Silva (2005) sugerem que a área ocupada pelas aberturas seja limitada a 25% da superfície do vedo, de modo a não comprometer a eficiência da compartimentação. Se a presença de elementos translúcidos nestas aberturas for imprescindível ou obrigatória, devem ser utilizados vidros especiais, resistentes à temperatura elevada e que minimizem a transmissão do calor radiante.

2.6.4 Aplicabilidade e discussões.

A busca por critérios sintetizados de compartimentação, aplicáveis às fases iniciais do projeto, esbarra na lacuna deixada pelas normas de âmbito nacional. Após um extenso levantamento na bibliografia normativa nacional e internacional, Costa, Ono e Silva são categóricos em afirmar que:

“não existe norma brasileira específica sobre compartimentação de edificações atualmente, havendo somente citações à necessidade de sua implementação ou à instalação de proteção ativa como forma de ampliar a

área compartimentada em normas correlatas” (COSTA, ONO E SILVA, 2005, p. 11).

Dessa maneira, os critérios de compartimentação ficam subjugados aos regulamentos municipais e estaduais, representados pelos Códigos de obras e Decretos dos corpos de bombeiros, respectivamente.

As Instruções Técnicas [IT's] do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo – CBPMESP são, indiscutivelmente, as melhores regulamentações a serem seguidas na ausência ou deficiência de parâmetros normativos adotados em outros estados. Todavia, a efetiva aplicabilidade fora do estado de São Paulo depende da homologação por parte dos órgãos fiscalizadores de cada estado ou município. Seria desejável que em um país como o Brasil, carente de pesquisadores especializados na área de SCIE, as boas práticas desenvolvidas por uma instituição de referência fossem imediatamente adotadas em âmbito nacional. O contexto atual gera discrepâncias quanto aos critérios de SCIE adotados em estados vizinhos acerca de um sinistro que não sofre qualquer influência da localização geográfica onde ocorre.

2.7 Simulação Computacional

A simulação computacional aplicada à construção civil compreende os programas de avaliação de desempenho dos elementos construtivos ou dos sistemas prediais. Os recursos computacionais vêm sendo utilizados para estimar o comportamento térmico e energético de edificações desde a década de 1970, estimulados pela crise mundial de energia daquela época. Há diversos programas comerciais e acadêmicos na área de SCI, cujos algoritmos simulam fenômenos de mecânica de fluidos ou de movimentação de pessoas.

Comparado aos ensaios experimentais, a simulação computacional apresenta maior praticidade na obtenção dos resultados e flexibilidade para a realização de estudos paramétricos. Estima-se que os custos de uma simulação sejam inferiores aos testes de laboratório, principalmente se for considerada a infraestrutura necessária para ambos os métodos. Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, as simulações apresentam incertezas que podem proporcionar resultados nem sempre fidedignos à situação real. As incertezas podem ser

decorrentes da escolha equivocada do modelo matemático que representa o fenômeno físico, da simplificação acentuada da geometria da envoltória ou da incorreta caracterização das condições de contorno.

2.7.1 Simulação computacional de Fluidos

A simulação computacional de fluidos [CFD] é uma alternativa mais acessível aos testes em túneis de vento, por demandar menor infraestrutura e dispensar a confecção de maquetes físicas. Além disso, os *softwares* consomem menos energia, não demandam custos de manutenção mecânica, permitem que toda a operação seja realizada por apenas um usuário, não demandam equipe de apoio e apresentam diversas maneira de visualização dos resultados através de imagens, vídeos, tabelas, gráficos, dentre outras.

O surgimento dos programas de CFD é atribuído à indústria aeroespacial nas décadas de 1960 e 1970. Atualmente são utilizados em diversas áreas, como na indústria automobilística, naval, de manufaturados; astrofísica, meteorologia, oceanografia, etc. A engenharia e arquitetura são campos mais recentes de aplicação desta ferramenta (TRINDADE, 2006).

Os códigos utilizados pelos programas de CFD baseiam-se em diferentes métodos para resolver as equações de escoamento de fluidos, também conhecidas por equações de Navier-Stokes⁸. O mais comum é a técnica dos volumes finitos, no qual a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões denominadas volumes de controle. Assim, as equações são discretizadas⁹ e resolvidas iterativamente em cada volume de controle, resultando em uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos no interior do domínio.

Os programas de CFD são desenvolvidos, normalmente, para diversas aplicações que envolvem o escoamento de fluidos. Se por um lado esse caráter

⁸ As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem o movimento de substâncias fluidas, líquidos e gases, cujas derivadas parciais permitem determinar os campos de velocidade e de pressão em um escoamento. Foram desenvolvidas no século XIX por Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes.

⁹ Discretizar significa tornar discreto ou descontínuo; ou seja, transformar uma distribuição contínua em unidades individuais com menor complexidade, com a finalidade de facilitar cálculos.

generalista permite a utilização de um mesmo *software* em situações distintas que envolvem a dinâmica de fluidos, por outro lado incumbe o operador de configurar uma grande quantidade de variáveis necessárias para a correta caracterização do objeto de estudo. A solução de problemas envolvendo a dinâmica dos fluidos requer do usuário não só a habilidade de configurar a ferramenta, mas também de compreender os fenômenos físicos envolvidos e um bom entendimento das soluções numéricas. O ajuste da simulação envolve decisões que devem ser tomadas em função do nível de complexidade e dos resultados esperados para cada estudo.

A falta de integração entre a simulação computacional e o processo projetual consiste numa barreira para a aceitação dessa ferramenta na prática arquitetônica. Diferentemente dos programas CAD, os programas de CFD não são, de maneira geral, afeitos ao processo projetual arquitetônico. Assim, a simulação computacional, quando empregada, é utilizada para testar a proposta arquitetônica final, confirmando o sucesso ou fracasso das escolhas adotadas. (MORBITZER, et al., 2001).

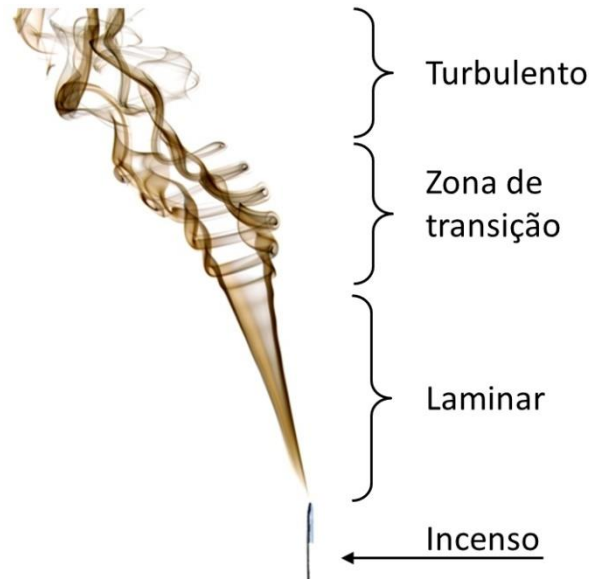
2.7.2 Modelos de turbulência

O escoamento de um fluido pode acontecer sob dois regimes: laminar e turbulento. O regime laminar é caracterizado por um fluxo que se move de forma ordenada, em camadas sobrepostas e com a mínima agitação entre elas. As linhas de corrente não se cruzam e o vetor velocidade tende a ser constante em cada ponto do escoamento. O regime laminar ocorre principalmente em escoamentos controlados, de baixa velocidade e sem perturbações externas. O embasamento teórico desse fenômeno encontra-se plenamente desenvolvido no ramo da física denominado mecânica dos fluidos e as equações utilizadas para descrevê-lo foram inicialmente formuladas no século XIX (MUNSON; DONALD e OKIISHI, 2004).

O regime turbulento é caracterizado por um movimento caótico e imprevisível das partículas, no qual o vetor velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do escoamento. O regime turbulento ocorre com maior frequência nos fenômenos cotidianos, onde não há o rígido controle das variáveis e em função da intensa interação do escoamento com os elementos e as características do entorno (Figura 2. 7). A turbulência é um fenômeno ainda em

desenvolvimento na física moderna e as equações empregadas para descrevê-lo resultam, normalmente, de experimentos, o que justifica a frequente utilização de coeficientes empíricos.

Figura 2. 7 – Exemplo elucidativo dos escoamentos laminar e turbulento, a partir da fumaça oriunda de um incenso aceso



Fonte: Imagem da Internet¹⁰, Adaptado.

Os programas de CFD utilizam modelos matemáticos que buscam reproduzir a turbulência verificada em fenômenos reais. O tempo de processamento e as incertezas de uma simulação estão fortemente ligados ao modelo de turbulência adotado. Os dois métodos mais explorados na bibliografia são: a Simulação Numérica Direta [DNS¹¹, na sigla em inglês] e os Modelos de Turbulência Aproximada, que se divide em Reynolds-médio Navier-Stokes [RANS, na sigla em inglês] e a Simulação de Grandes Vórtices [LES¹², na sigla em inglês].

¹⁰<http://3.bp.blogspot.com/-ozlimJK1zwU/TkK37FEw-1I/AAAAAAAAAVM/Gnwb25Q_1HQ/s1600/aincenso.jpg>

¹¹ *Direct Numerical Simulation* [DNS] é um método de solucionar as equações de Navier-Stokes sem o uso dos modelos de turbulência. Isso significa dizer que toda a gama de escalas temporais e espaciais de turbulência são resolvidas. O DNS é um método bastante eficiente para testar o algoritmo de resolução, especialmente nos casos de fluxo no regime permanente.

¹² *Large Eddy Simulation* [LES] é um modelo matemático de turbulência utilizado na dinâmica computacional de fluidos. Foi inicialmente proposto em 1963 por Joseph Smagorinsky para simular correntes de ar atmosféricas e seus desdobramentos vem sendo aplicados em diversas áreas da engenharia, tais como: combustão, acústica e simulações de contorno da camada atmosférica.

O método DNS soluciona sem aproximações as equações de Navier-Stokes, o que requer malhas refinadas o suficiente para que os menores vórtices sejam calculados. O refinamento de malha exigido por esse método torna-o incompatível com estudo de média ou grande escala, a exemplo de simulações em edificações e seu entorno.

O modelo LES utiliza valores médios de velocidade na solução numérica de turbulência em seu processo de aproximação. Trabalhos realizados mostram que o modelo LES é capaz de simular fluxos naturalmente dirigidos com sucesso (TAN, 2005). Todavia, o LES exige bastante afinidade com o comportamento da turbulência e experiência com simulações numéricas, além apresentar elevado tempo de processamento mesmo em computadores de alto desempenho.

O modelo RANS trata da solução de equações reduzidas, resultantes daquelas que são complexas demais para serem solucionadas na íntegra. Segundo TAN (2005), em comparação aos modelos DNS e LES, o RANS tende a ser mais simples e a apresentar maior rapidez de convergência para a simulação de fluidos naturalmente dirigidos. A opinião sobre o modelo de turbulência mais eficaz é controversa entre os autores. Enquanto Tan (2005) defende o modelo RANS, Chen (2008) afirma que o modelo LES é superior em função da pouca, ou até mesmo nenhuma, dependência dos coeficientes empíricos.

2.7.3 Simulação Computacional de incêndio

A compreensão da dinâmica do fogo, dos efeitos da fumaça e da temperatura pode ser obtida por meio da simulação computacional, com o objetivo de prever os efeitos danosos de um incêndio e intervir para que eles não ocorram. A ideia de estudar numericamente a dinâmica do fogo remonta ao início da era da informática, uma vez que as equações fundamentais da mecânica dos fluidos foram descritas a mais de um século. Apesar disso, modelos matemáticos de incêndio, distintos da combustão controlada, são relativamente recentes, dada a complexidade inerente ao problema (GISSI, 2010).

A simulação computacional de incêndio é uma vertente do CFD no qual o fluxo do fluido é fortemente induzido pela elevada diferença de temperatura. O projetista pode fazer uso de simulações para determinar o tipo de compartimentação mais eficaz do ponto de vista da SCI e o posicionamento correto da escada de emergência em função da forma do edifício, bem como indicar os materiais mais adequados de acordo com a resistência ao fogo e propagação de fumaça. (ALVES; CAMPOS e BRAGA, 2008). Contudo, Braga e Landim fazem a seguinte ressalva:

“Obviamente, a simulação não traz em si todas as respostas sobre o incidente, pois é apenas mais uma ferramenta, mas a sua utilização pelo investigador, em conjunto com o seu conhecimento em engenharia de proteção contra incêndio e do método científico de investigação de incêndio, faz com que possam ser obtidos resultados bem consolidados.” (BRAGA e LANDIM *In*: SEITO [coord.] et al, 2008, p. 342).

As simulações de incêndio abordadas na bibliografia pesquisada dividem-se, basicamente, em duas categorias: (1) desenvolvimento das chamas e dispersão dos subprodutos e (2) evacuação de pessoas. Nada impede a simulação de ambas as categorias simultaneamente, apesar desse tipo de estudo ser menos frequente. Em qualquer um dos casos fica evidente como a modelagem tridimensional ajuda a visualização e a compreensão das possíveis falhas que a representação tradicional em duas dimensões não permite identificar com facilidade.

No cenário internacional, a simulação de incêndio já é utilizada como ferramenta de avaliação das decisões projetuais de edifícios de alto padrão ou de patrimônio histórico. O objetivo é avaliar a performance dos projetos quando submetidos a normas baseadas no desempenho, tendo em vista que a maioria das normas prescritivas empíricas revela-se inadequadas para projetos de alta complexidade. Segundo Gouveia e Souza (2008),

“... a utilização do sistema baseado em desempenho é recomendável em programas mais complexos, como, por exemplo, em edifícios históricos, uma vez que torna a inovação das estratégias de segurança em um fator condicionante no processo de projeto” (GOUVEIA e SOUZA, 2008, p. 3).

A simulação permite uma avaliação de risco mais fidedigna, tornando os projetos economicamente viáveis e adequados às peculiaridades do empreendimento, sem deixar de atender aos aspectos de segurança.

No Brasil, a utilização de simuladores de incêndio no desenvolvimento de projetos de arquitetura e de prevenção de incêndio ainda é muito restrita (SCHEER e BARANOSKI, 2007). Embora os *softwares* viabilizem a resolução dos extensos cálculos envolvidos em uma situação de incêndio, o uso exige dos usuários um conhecimento prévio do comportamento do fogo e das características físico-químicas dos materiais empregados na construção civil. Logo, a aplicação da simulação de incêndio no cenário nacional concentra-se na reconstituição e investigação de incêndios pregressos e ainda está fortemente ligada ao meio acadêmico.

Os programas de simulação permitem uma visualização da evolução de um incêndio. Porém, em razão da complexidade e do grande número de variáveis existentes, o fenômeno é normalmente tratado de forma simplificada (SCHEER E BARANOSKI, 2007). Logo, os resultados obtidos devem ser analisados e utilizados com certa prudência, uma vez que o grau de simplificação adotado no modelo ou na caracterização física dos materiais e do entorno pode prejudicar a validade da simulação. Dentre as dificuldades envolvidas na modelagem numérica do incêndio, Gissi (2010) destaca:

- a) Os inúmeros cenários possíveis a serem considerados em função da natureza incidental do incêndio;
- b) A capacidade de processamento necessário para o cálculo das variáveis físicas envolvidas versus a limitação computacional disponível;
- c) O 'combustível' de um incêndio dificilmente configura um elemento único ou plenamente conhecido, nem tão pouco controlado.

Mesmo diante das dificuldades, a disseminação deve ser estimulada para além do meio acadêmico. A simulação computacional de incêndio constitui uma importante ferramenta na elaboração de projetos, pois permite a comprovação do que prescreve a norma, além de possibilitar a adoção de soluções alternativas, personalizadas e de baixo custo de SCI (ALVES, CAMPOS E BRAGA, 2008).

Existem diversos *softwares* de simulação computacional de incêndio, contudo a maioria corresponde a licenças comerciais. Os programas gratuitos são, normalmente, desenvolvidos e disponibilizados por institutos de pesquisa interessados em difundir a utilização e fomentar estudos com o uso do CFD. Todavia, esses programas normalmente apresentam uma interface pouco amigável e exigem elevado grau de conhecimento teórico para a elaboração do modelo e das condições de contorno. De uma maneira bastante resumida, pode-se dizer que os programas gratuitos são desenvolvidos por pesquisadores e para pesquisadores, sem preocupação com usuários de outras áreas.

Os desenvolvedores de *softwares* comerciais, com o compreensível interesse em cativar o usuário, buscam dirimir as dificuldades operacionais encontradas nos programas gratuitos. Por vezes, as licenças comerciais utilizam o algoritmo dos *softwares* gratuitos para o processamento do modelo e desenvolvem apenas a interface de entrada de dados, por meio dos seguintes artifícios: incorporando ferramentas de modelagem ou aceitando modelos elaborados em outros programas CAD; oferecendo suporte técnico durante a vigência da licença e disponibilizando *templates* de casos típicos. Na Tabela 2. 5 elenca-se alguns dos programas citados nos estudos de simulação de incêndio.

Tabela 2. 5 – Comparativo dos *softwares* de simulação de incêndio

PROGRAMA	PROPÓSITO	INTERFACE	OBSERVAÇÃO
FDS	Geral (CFD)	Texto	Gratuito
Evac	Movimentação de pessoas	Texto	Gratuito, módulo do FDS
SMV	Visualização	Gráfica	Gratuito, compõe o pacote do FDS.
CFast	Determinação da camada térmica, em modelos de duas zonas.	Paramétrica	Gratuito, dos mesmos desenvolvedores do FDS.
Pyrosim	Geral	Gráfica	Comercial. É uma interface gráfica para o FDS [CYPE]
Pathfinder	Evacuação	Gráfica	Comercial [<i>Thunderhead Engineering</i>]
BehavePlus	Comportamento de incêndios florestais	Paramétrica	Gratuito [<i>Fire Research and Management Exchange System</i>]
Exodus	Evacuação	Gráfica	<i>Fire Safety Engineering Group - University of Greenwich</i>
SMARTFIRE	CFD de incêndio	Gráfica	<i>Fire Safety Engineering Group - University of Greenwich</i>

PROGRAMA	PROPÓSITO	INTERFACE	OBSERVAÇÃO
CRUNCH	CFD	Gráfica	Comercial. Utilizado pela <i>BRE Group</i>
JASMINE	Interface de incêndio do PHOENICS	Gráfica	Comercial. Utilizado pela <i>BRE Group</i> .

3 MATERIAL E PROCEDIMENTOS

Primeiramente é válido lembrar que a SCIE é ainda um tema embrionário nos grupos de pesquisa em arquitetura no Brasil. Os primeiros estudos datam da década de 1970 e são esporadicamente retomados a partir de estímulos resultantes de incidentes de grande visibilidade. O uso da simulação computacional na área de SCIE é ainda mais recente, assim como a mudança de foco na formulação das recomendações projetuais, que paulatinamente deixam de ser empíricas e prescritivas para ser baseadas no desempenho. A soma desses fatores dificulta a consolidação de procedimentos bem definidos para os estudos de SCIE, como pôde ser verificado referencial bibliográfico pesquisado.

A respeito da definição de método, Lucena (2011) expõe que:

“O método pode ser definido como o conjunto de recursos da pesquisa nos quais se inserem as técnicas, as construções lógicas, a linguagem etc., que visam estabelecer proposições, com maior ou menor grau de confiabilidade, acerca de determinada realidade, cuja construção deve ser gradativa e ausente de lacunas de sentido. O tipo de método a ser utilizado, portanto, deve ser adequado ao objeto estudado”. (LUCENA, 2011, p. 21 -22).

Inicialmente acreditou-se que o método denominado hipotético-dedutivo atenderia às particularidades do estudo, pois contempla a etapa de testes como principal forma de validação de uma hipótese inicialmente proposta. Entretanto, a formulação geral do método hipotético-dedutivo consiste em “buscar a verdade eliminando tudo o que é falso” (PORANTIM, 2013, p. 1). Essa prerrogativa inviabilizou a utilização do referido método, uma vez que para se eliminar tudo que é falso seria necessário uma quantidade incalculável de testes, de modo a contemplar os mais diversos cenários possíveis de incêndio. Ainda sobre o supracitado enunciado, destaca-se que o estudo não objetivava estabelecer uma ‘verdade’ a respeito da compartimentação seletiva, mas sim analisar o comportamento dessa forma de confinamento.

Apesar da possibilidade de adaptação, entendeu-se que a aplicação do método hipotético-dedutivo exigiria uma alteração estrutural do seu enunciado, que interferiria significativamente na sua lógica de funcionamento. Uma alternativa para a

aplicação tradicional do método seria a reformulação da hipótese para algo como: “A compartimentação seletiva não é capaz de proporcionar qualquer proteção à vida dos ocupantes da edificação em uma situação de incêndio”. Assim, bastaria que um teste falseasse a hipótese para comprovar o que se desejava de fato. Apesar manter intacta a essência do trabalho a formulação negativa da hipótese foi refutada por contrariar a linha de raciocínio do autor.

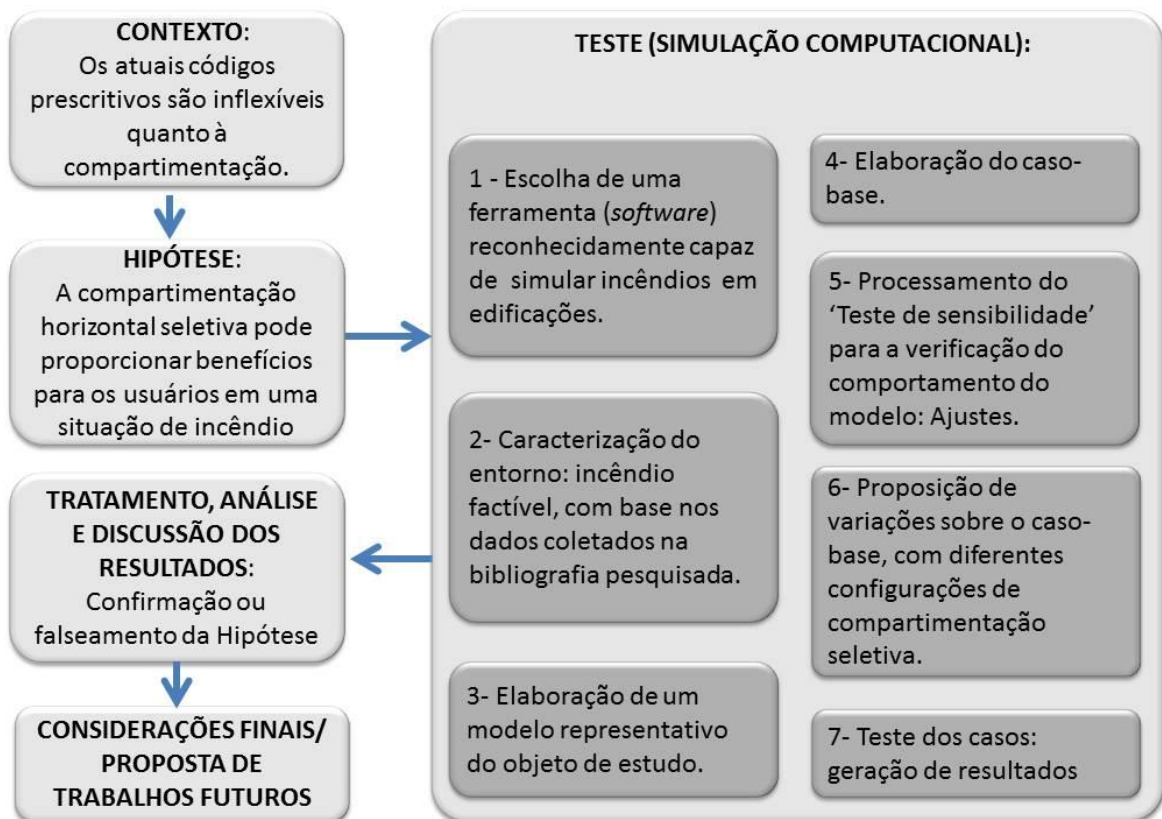
Diante desse contexto, buscou-se a estruturação da pesquisa mediante um método que permitisse a investigação da hipótese por meio de procedimentos práticos. Do ponto de vista do método, a pesquisa tratada nesse documento apresenta a mesma lógica de um estudo experimental, que é a investigação de uma hipótese mediante a análise dos resultados obtidos em ensaios realizados a partir de modelos representativos do objeto do estudo. A única diferença é que, ao invés de testes laboratoriais, foi utilizada a simulação computacional como o instrumento para testar a hipótese, e essa é uma alteração irrelevante para o método.

Considerando que é conferido ao pesquisador “a saudável ousadia de propor um novo método, contanto que haja coerência nas suas proposições” (LUCENA, 2011, p. 28), estruturou-se o desencadeamento lógico da pesquisa a partir das etapas elencada a seguir e organizada conforme na Figura 3. 1:

- a) Contexto: Observa-se a recorrente reconfiguração dos ambientes, realizada a revelia de qualquer critério de desempenho, em edificações que apresentam uma dinâmica de uso durante a fase de ocupação;
- b) Problema: as prescrições normativas ignoram formas alternativas de particionamento, o que desestimula estudos para avaliar o desempenho da compartimentação seletiva;
- c) Hipótese: conforme descrito no item 1.2, a compartimentação seletiva pode apresentar desempenho satisfatório na proteção à vida dos ocupantes de uma edificação em uma situação de incêndio;
- d) Teste: avaliar o desempenho de diferentes configurações dimensionais de compartimentação seletiva, em um modelo representativo de uma edificação construída;

- e) Ferramenta: o *software Fire Dynamics Simulator* (NIST, 2014), referenciado na bibliografia como uma ferramenta adequada na simulação de incêndio em edificações.

Figura 3. 1 – Fluxograma da aplicação do método empregado no presente trabalho



3.1 Fire Dynamics Simulator - FDS

O *software* mais recorrente na bibliografia pesquisada para simulação de incêndio é o *Fire Dynamics Simulator* [FDS], desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology*¹³ [NIST]. Desde o seu desenvolvimento, em 2000, o FDS vem sendo utilizado na resolução de problemas de engenharia de proteção ao fogo e em pesquisas da dinâmica do fogo e combustão.

¹³ O NIST é um instituto norte-americano, fundado em 1901, com a missão de promover a inovação e competitividade industrial americana por meio de medidas científicas avançadas, normas e tecnologia (DEL CARLO, *In*: SEITO [coord.] et al., 2008).

O FDS é um *software* de CFD que permite simular uma situação de incêndio em edificações com múltiplos compartimentos. “Ele resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriada para escoamentos de baixa velocidade, com fluxo termicamente dirigido e com ênfase no transporte de calor e fumaça dos incêndios” (BRAGA e LANDIM *In*: SEITO [coord.] et al, 2008, p. 343). A partir das simulações realizadas no FDS é possível conhecer, por exemplo: a formação, o deslocamento, a altura e temperatura da camada de fumaça; a evolução das chamas, e a taxa de oxigênio consumida durante o incêndio. O modo padrão do FDS adota o modelo de turbulência LES. Contudo é possível adotar o modelo DNS quando a malha é suficientemente refinada.

Os dados de entrada são os parâmetros inseridos pelo usuário e interpretados pelo FDS para a construção do cenário e das propriedades físico-químicas dos materiais analisados (MARIANI. e SILVA, 2011). Os dados de entrada são elaborados pelo operador em um arquivo de texto (Figura 3. 2), o qual deve conter todas as informações do(a):

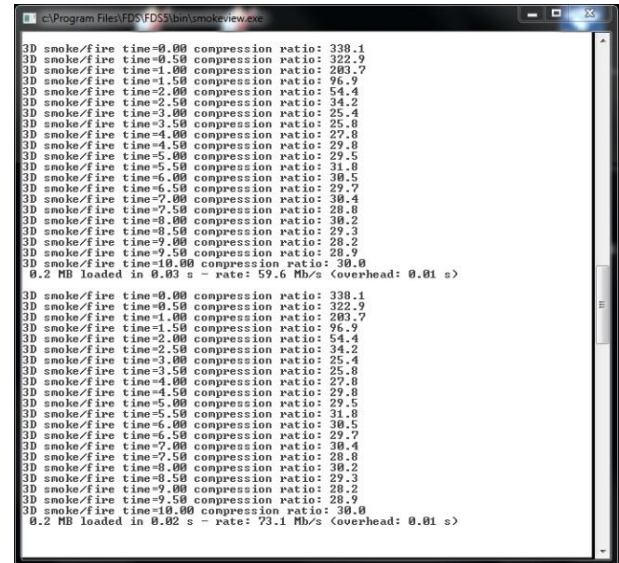
- a) Modelo;
- b) Domínio,
- c) Malha,
- d) Tempo de simulação
- e) Condições de contorno,
- f) Propriedades dos materiais,
- g) Condições de combustão,
- h) Tipo e modo de apresentação dos resultados gerados.

O processamento ocorre em modo MS-DOS e o operador é informado apenas do tempo transcorrido da simulação (Figura 3. 3).

Figura 3. 2 - Arquivo de texto com dados de entrada

```
room.fds - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
&HEAD CHID='room', TITLE='room fire model' /
&MESH IJK=40,40,50, XB=0,4,0,4,0,5 /
&TIME T_END=500. /
&OBST XB=1.5,2.5,1.5,2.5,0,0.5 /
&SURF ID='fire', HRRPUA=500 /
&VENT XB=1.5,2.5,1.5,2.5,0.5,0.5, SURF_ID='fire' /
&VENT MB='XMN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /
```

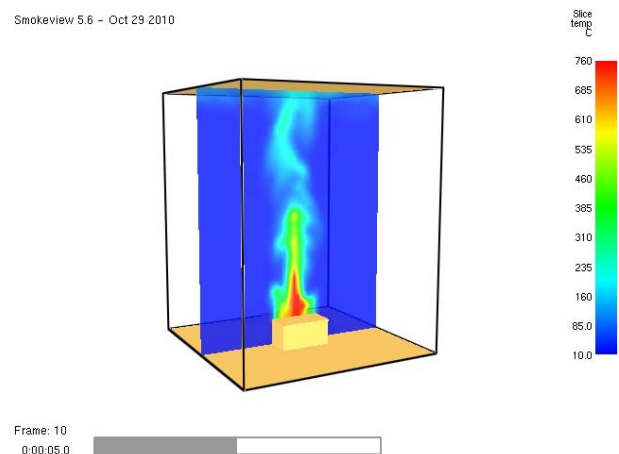
Figura 3. 3 – Simulação em curso



Os dados de saída do FDS são gerados em formatos distintos. Dentre eles, destacam-se os dados tabulados¹⁴ (Figura 3. 4) e a visualização gráfica (Figura 3. 5), por meio do *software* Smokeview, incluído no pacote de instalação do FDS.

Figura 3. 4 – Arquivo de dados tabulados

Figura 3. 5 – Saída gráfica com isotermas



Cabe salientar que ambos os programas são disponibilizados gratuitamente e permitem a adoção dos padrões nacionais de normatização e de sistema construtivo. Existem programas comerciais para facilitar a entrada de dados no FDS

¹⁴ Arquivos com extensão '*.csv', com dados organizados em linhas e colunas, separados por vírgulas, visualizáveis por meio de editores de planilhas eletrônicas.

e a importação de arquivos de CAD. Contudo, refutou-se a utilização desse recurso para que a pesquisa não ficasse atrelada a uma empresa específica.

A simulação computacional de incêndio é normalmente empregada na reconstituição de incêndios pregressos ou na reprodução de experimentos laboratoriais, como pode ser verificado em Ruschel (2011) (Figura 3. 6 e Figura 3. 7), Mazzoni (2010) (Figura 3. 8 e Figura 3. 9) e Rodrigues (2009) (Figura 3. 10 e Figura 3. 11). Nesses casos, os dados de referência estavam disponíveis para a gradual calibração dos modelos e a consequente validação dos resultados gerados pelas simulações.

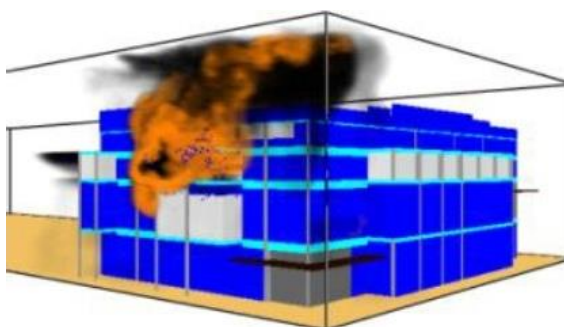
O presente estudo diferenciou-se dessa aplicação convencional do FDS, ao propor um incêndio hipotético sobre um modelo representativo de sala de aula. Diante da ausência do evento de referência para a elaboração do arquivo de entrada de dados, a simulação foi alimentada com informações extraídas do referencial bibliográfico. É compreensível, portanto, o surgimento de questionamentos a respeito da representatividade dos valores adotados no arquivo de entrada de dados e acerca da incerteza dos resultados diante de um incêndio real. Todavia, valendo-se da premissa de que não existem dois incêndios iguais, defende-se que um incêndio modelado a partir dos dados retirados da bibliografia representa ao menos um evento plausível dentre os casos possíveis.

Figura 3. 6 – Resultado do incêndio no Shopping Total, em Porto Alegre/RS.



Fonte: Ruschel (2001).

Figura 3. 7 – Reconstituição do incêndio no FDS.



Fonte: Ruschel (2001).

Figura 3. 8 – Resultado do incêndio no Edifício Cacique, em Porto Alegre/ RS



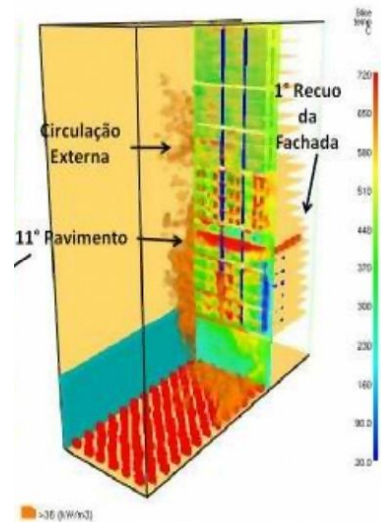
Fonte: Mazzoni (2011).

Figura 3. 10 – Ensaio laboratorial da compartimentação vertical externa.



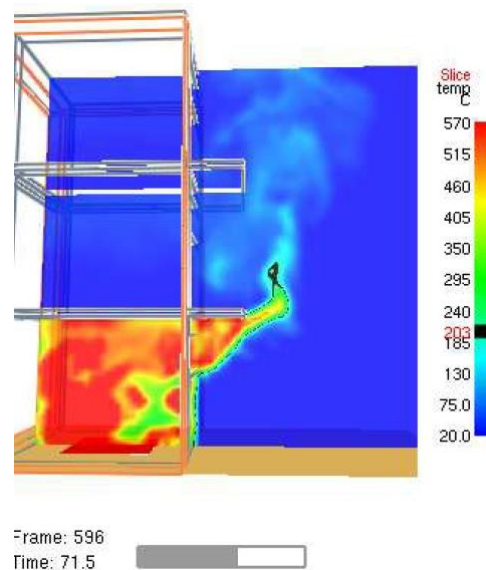
Fonte: Rodrigues (2009).

Figura 3. 9 – Reconstituição do incêndio no Pyrosim, a partir dos dados coletados na perícia da edificação incendiada



Fonte: Mazzoni (2011).

Figura 3. 11 – Reprodução do ensaio no FDS, com base nos dados coletados no experimento



Fonte: Rodrigues (2009).

Quanto à estruturação do estudo, percebeu-se que os métodos tradicionais de pesquisa científica são voltados para investigação teórica das hipóteses formuladas, típica das ciências humanas, e que a utilização deles em estudos experimentais exige adaptações.

3.1.1 Condições de contorno

A caracterização de uma simulação no FDS é realizada atribuindo-se valores para as propriedades térmicas dos objetos e superfícies que compõem o modelo. Os elementos desprovidos de parâmetros termoquímicos são tratados como inertes pelo *software*. É possível modificar as condições do meio, tais como gravidade, pressão atmosférica, temperatura. Contudo, diferentemente dos objetos, a não atribuição de valores normalmente condiciona o *software* a utilizar valores padronizados e fisicamente aceitáveis para a maior parte dos casos.

A caracterização das condições de contorno envolve: (a) a descrição das fases do incêndio: ignição, crescimento, desenvolvimento e extinção; (b) o comportamento das chamas e de seus subprodutos e (c) a interação desses com as variáveis ambientais e com os sistemas de proteção. Trata-se de um ponto crítico na simulação de incêndio, dada a quantidade de variáveis envolvidas. É preciso, portanto, selecionar um conjunto reduzido e manipulável de variáveis, dentre as possibilidades existentes. A ISO 16733 (ISO, 2006) recomenda que a metodologia empregada na seleção das condições de contorno seja adaptada aos objetivos do projeto de segurança contra incêndio: evacuação dos ocupantes, preservação do patrimônio ou preservação da construção.

Prasad et al. (2009) expõem a dificuldade em simular adequadamente a decomposição dos materiais em subprodutos gasosos, líquidos e sólidos durante o processo de combustão. Segundo os autores, essa dificuldade surge em função da pouca compreensão a respeito dos fenômenos físicos que ocorrem durante a decomposição, bem como da caracterização insipiente das propriedades fundamentais que controlam o processo de combustão.

A fiel reprodução de um incêndio exige que sejam atribuídas propriedades complementares, tais como: tempo de queima e fração do material transformada em fumaça. Mcgrattan; Hostikka e Floyd (2007) afirmam que a transferência de calor e de massa através da superfície do material é normalmente baseada em experimentos empíricos, entretanto, é possível manipular essa variável quando se realizam cálculos no modo DNS. É possível potencializar o estudo do comportamento da fumaça inserindo, no arquivo de entrada de dados, um material

que reage com a chama. Os trabalhos que utilizam o FDS na simulação de incêndio em edificações costumam empregar o ‘poliuretano padrão’ do programa para tal finalidade. Alves (2010, p. 206), por exemplo, defende a escolha desse material por considerá-lo representativo dos elementos frequentemente encontrados em escritórios. Apesar de também embasar a escolha desse material por sua capacidade de emitir bastante fumaça ao ser queimado, o autor não cita o valor atribuído à variável que determina a fração do composto transformada em fumaça¹⁵. Quanto à localização do queimador, o autor sugere o centro da sala, pois tal posição permite a observação da movimentação da fumaça em ambos os lados do pavimento.

A potência de incêndio é uma grandeza de relevante importância em uma simulação, responsável pelo aquecimento dos gases, dos objetos e das superfícies presentes. Logo, sua correta discriminação no arquivo de entrada de dados é decisiva na representatividade dos resultados obtidos. O FDS calcula a taxa de liberação de energia [HRR, na abreviação em inglês], por meio do produto das variáveis HRRPUA¹⁶ e a área da superfície queimante.

A IT 15-5/ 2011 (CBPMESP, 2011, p. 370) recomenda que no cálculo de dimensionamento dos sistemas de controle de fumaça em edificações térreas e sem proteção por chuveiros automáticos seja adotada a taxa de liberação de calor de 350 kW/m² em ocupações educacionais. Contudo, observou-se que o valor dessa variável variou significativamente dentre os autores pesquisados que trabalham com simulação de incêndio. Encontra-se o HRRPUA variando de 250 kW/m² (FAKURY; CALDAS e BRANCO, 2011) até 1000 kW/m² (ALVES, 2011). Ruschel (2011) arbitrou a HRRPUA em 5000 kW/m² na reconstituição de um incêndio ocorrido em um shopping center em Porto Alegre/RS. Contudo, de acordo com a autora, o valor da taxa de liberação de calor foi propositalmente majorado na ordem de 10² para que fosse acelerado o processo na simulação. Segundo Ruschel (2011): “(...) dada essa estratégia, as simulações de 2 min equivalem a aproximadamente 3:20h (sic) de incêndio real” (RUSCHEL, 2011, p. 79). Por sua vez, Cunha e Martinelli Jr. (*In*:

¹⁵ No FDS, essa propriedade é determinada pelo parâmetro “SOOT_YIELD”.

¹⁶ HRRPUA é a abreviatura de ‘Heat Release Rate Per Unit Area’.

SEITO [coord.] et al., 2008) sugerem uma taxa de liberação de calor entre 60 e 500 kW/m² para a definição de projetos de sistema de controle e fumaça.

A posição inicial da chama dentro do ambiente é uma variável determinante na elaboração da simulação. Ao estabelecer procedimentos para a análise de incêndios, Pannoni e Silva (*In: Ibid.*, 2008) afirmam que o número dos possíveis cenários de incêndio pode se tornar muito grande, mesmo em uma edificação simples. Contudo, é desnecessário conhecer todos eles, sendo o mais usual identificar pelo menos mais de um cenário crítico para uma avaliação detalhada. No caso de compartimentos isolados de pequena dimensão, o autor sugere identificar o cenário que representa claramente o pior caso.

Ainda sobre a caracterização das condições de contorno, é oportuno registrar a frequente omissão dentre os autores pesquisados em descrever as propriedades térmicas dos materiais empregados em suas simulações. A ausência de tais informações leva o leitor a pensar sobre duas hipóteses: (1) os autores caracterizam corretamente os materiais participantes da simulação, porém consideram irrelevante transcrever minuciosamente suas propriedades térmicas, ou (2) eles desconhecem a importância de caracterizar rigorosamente os elementos e as reações participantes do incêndio e adotam, involuntariamente, os padrões sugeridos pelo *software*.

A primeira suposição é admissível para fenômenos físicos simples, cujas variáveis são amplamente conhecidas. Seguramente esse não é o caso dos fenômenos físico-químicos envolvidos em um incêndio. Incorrer na segunda significa dizer que os autores conduziram suas simulações a partir de elementos e reações mal caracterizadas termicamente. Essa dedução é corroborada por um estudo conduzido por pesquisadores do NIST (PRASAD et al., 2009), que trata das dificuldades em simular a decomposição de elementos sólidos durante o processo de combustão.

3.1.2 Definições da malha

A simulação no FDS, assim como em outros programas de CFD, consiste em um ambiente virtual, denominado domínio¹⁷, composto pelos elementos participantes do fenômeno físico de interesse. O domínio é subdividido em células justapostas, dentro das quais são calculadas as equações da mecânica dos fluidos repetidas vezes. O conjunto destas células recebe o nome de malha.

O sucesso de uma simulação em CFD está diretamente ligado à correta definição da malha. Malhas espaçadas não são capazes de interpretar adequadamente os elementos contidos no domínio, ignorando aqueles cujas dimensões são significativamente inferiores ao tamanho de uma célula. Por outro lado, malhas densas aumentam consideravelmente a quantidade de cálculos a serem realizados, impactando diretamente no tempo de processamento e na estabilidade numérica. A malha pode ser considerada refinada quando assume a maior dimensão possível, permitindo que os resultados se estabilizem dentro de um tempo razoável, mas sem desconsiderar os elementos constituintes do domínio.

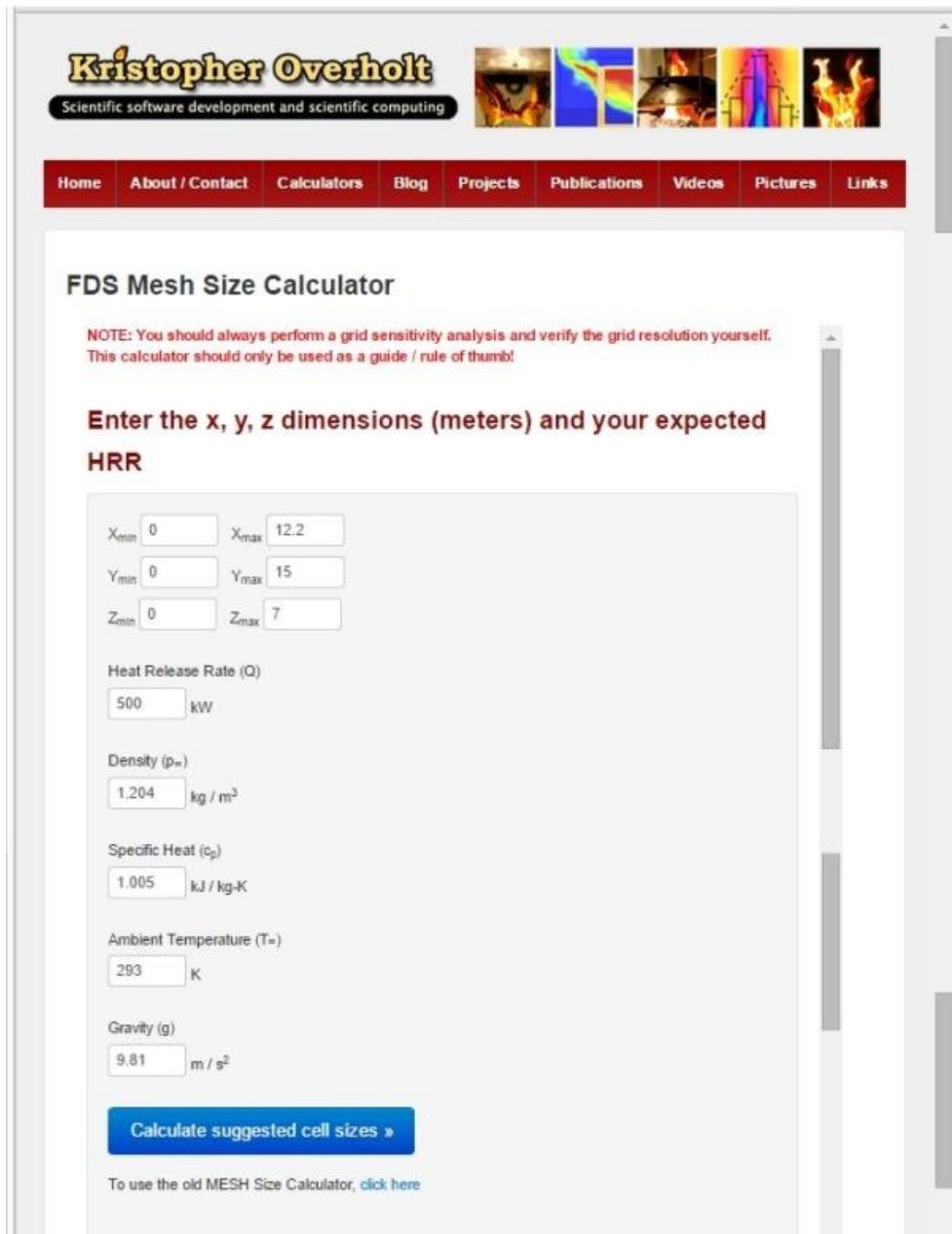
Não há um valor exato a ser empregado no dimensionamento da malha e diversos fatores precisam ser considerados, tanto de ordem teórica quanto operacional. O procedimento usual é iniciar as simulações com malhas espaçadas e ir reduzindo as dimensões das células a cada nova simulação até que os resultados se estabilizem (MCGRATTAN et al., 2014, p. 37). Para problemas típicos de arquitetura, células com dimensões entre 0,10 m e 0,05 m costumam apresentar resultados satisfatórios.

No caso específico do FDS, Gissi (2010. p. 60) afirma que células com dimensões de 10 cm podem ser adequadas para avaliar a propagação da fumaça e do calor através de um edifício em um incêndio considerável. Overholt (2007), por sua vez, desenvolveu e disponibilizou em sua página pessoal na *internet* uma ferramenta *on-line* para calcular a malha. A partir das informações de dimensão do domínio e taxa de liberação de calor (Figura 3. 12), o ‘calculador de malha’

¹⁷ O domínio é normalmente um prisma de base retangular com dimensão suficiente para comportar o objeto de estudo e, se desejável, o seu entorno imediato. Casos específicos podem suscitar domínios bidimensionais ou cilíndricos.

apresenta a quantidade de células em cada eixo [X, Y, Z], considerando três níveis de refinamento: 'grosseiro', 'moderado' e 'fino' (Figura 3. 13).

Figura 3. 12 – FDS Mesh Size Calculator - Exemplo de dados de entrada



Kristopher Overholt
Scientific software development and scientific computing

Home About / Contact Calculators Blog Projects Publications Videos Pictures Links

FDS Mesh Size Calculator

NOTE: You should always perform a grid sensitivity analysis and verify the grid resolution yourself. This calculator should only be used as a guide / rule of thumb!

Enter the x, y, z dimensions (meters) and your expected HRR

X_{min} X_{max}
 Y_{min} Y_{max}
 Z_{min} Z_{max}

Heat Release Rate (Q)
 kW

Density (ρ)
 kg / m³

Specific Heat (c_p)
 kJ / kg-K

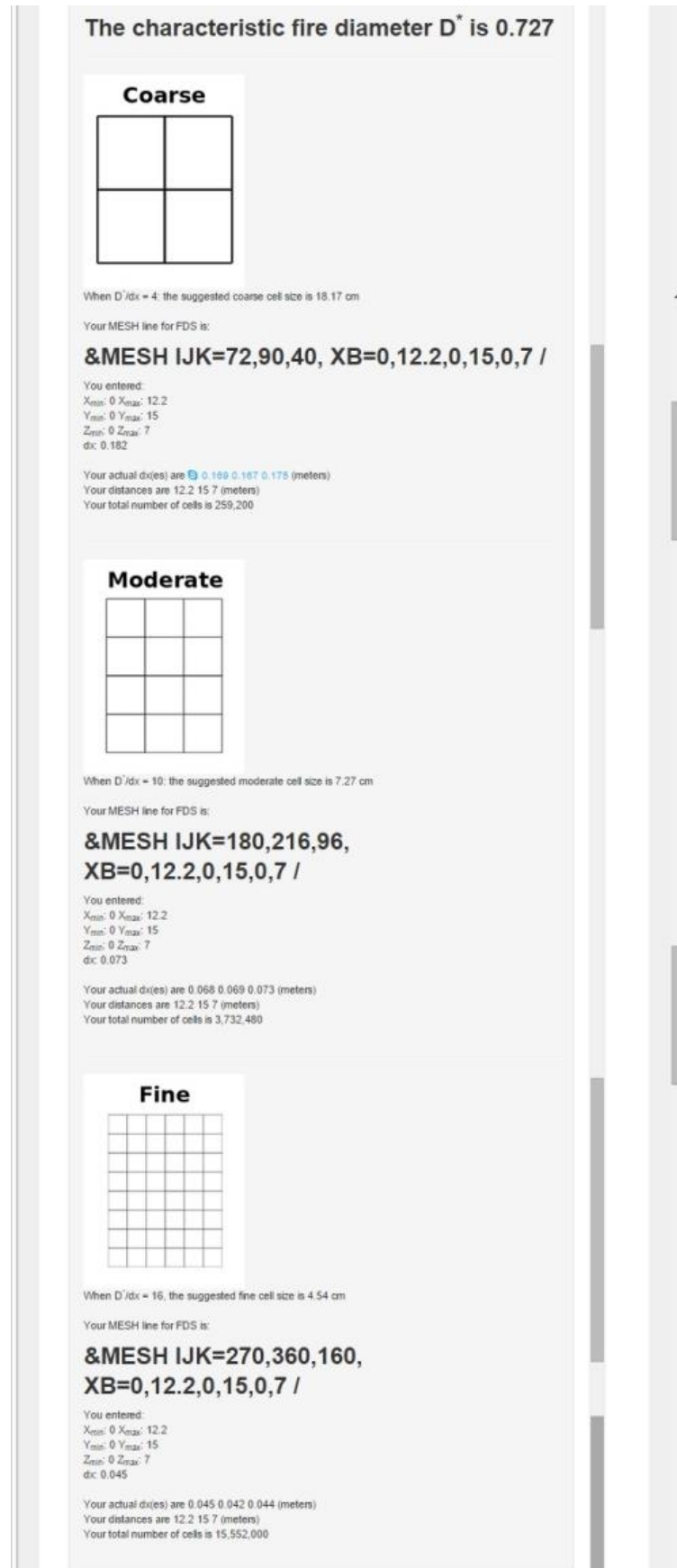
Ambient Temperature (T_∞)
 K

Gravity (g)
 m / s²

[Calculate suggested cell sizes »](#)

To use the old MESH Size Calculator, [click here](#)

Figura 3. 13 – FDS Mesh Size Calculator – Resultados



Fonte: OVERHOLT (2007), Adaptado.

De acordo com o manual do usuário, o cálculo da quantidade de células baseia-se em uma variável teórica denominada diâmetro característico da chama $[D^*]$ (McGRATTAN, et. al., 2014, p. 37). A partir do valor de D^* , obtém-se a dimensão linear da célula no eixo das abcissas $[dx]$ para cada uma das três categorias de refinamento, conforme indicado na Tabela 3. 1. Uma vez determinado o valor de dx , procura-se, com base nos números otimizados¹⁸ para as equações de Poisson¹⁹, a quantidade de células nos eixos Y e Z, de modo a gerar uma célula cúbica, preferencialmente.

Tabela 3. 1 – Refinamento de malha em função do diâmetro característico da chama.

GRAU DE REFINAMENTO DA MALHA	RELAÇÃO D^*/dx
Grosseiro	4
Moderado	8
Fino	16

3.2 Objeto de estudo

A edificação escolhida como objeto de estudo corresponde ao projeto-padrão do Bloco de salas de aula de dois pavimentos – BSA2P, desenvolvido na Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal Rural do Semiárido – SIN/ UFRSA. Trata-se de uma edificação de dois pavimentos, comportando²⁰ 667,00 m² no pavimento térreo e 725,00 m² no pavimento superior (Figura 3. 14 e Figura 3. 15). A diferença de área corresponde à projeção em balanço de um metro das salas do pavimento superior. A edificação é modulada e dispõe de cinco grandes salas no pavimento térreo, com 72,00 m², e outras cinco no pavimento superior com 82,00 m² cada. Em ambos os pavimentos o módulo central é composto pelo *hall* e pelas salas de uso múltiplo. Repetem-se nos dois pavimentos: a bateria de banheiros, os fossos de serviço e o corredor longitudinal central, com 2,0 m de largura e 38,0 m de comprimento.

¹⁸ Número que podem ser decomposto na forma: $2^l \times 3^m \times 5^n$, onde l , m e n são números inteiros. Por exemplo: $540 = 2^2 \times 3^3 \times 5^1$.

¹⁹ **Siméon Denis Poisson** (1781 - 1840): matemático e físico francês, desenvolveu modelos matemáticos com ampla utilização na eletrostática, engenharia mecânica e física teórica.

²⁰ Os valores de área foram arredondados para tornar a leitura mais dinâmica.

O *hall* em ambos os pavimentos permite o acesso aos elementos de circulação vertical e horizontal, bem como às salas de uso múltiplo. Em uma adaptação posterior, foi incluída uma copa sob o lance da escada. O corredor do pavimento térreo apresenta duas saídas de serviço, uma em cada extremidade. A circulação vertical fica a cargo de dois elementos: uma escada não enclausurada em forma de “U” e a plataforma de acessibilidade.

Figura 3. 14 – Planta Baixa: pavimento térreo – Bloco de salas de aula de dois pavimentos

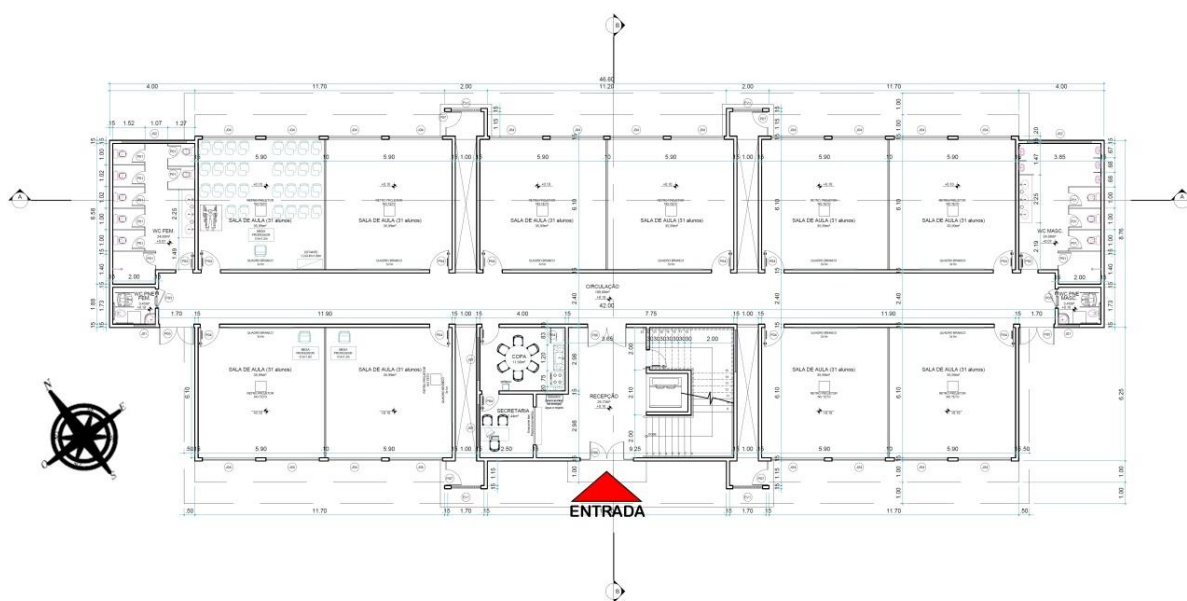
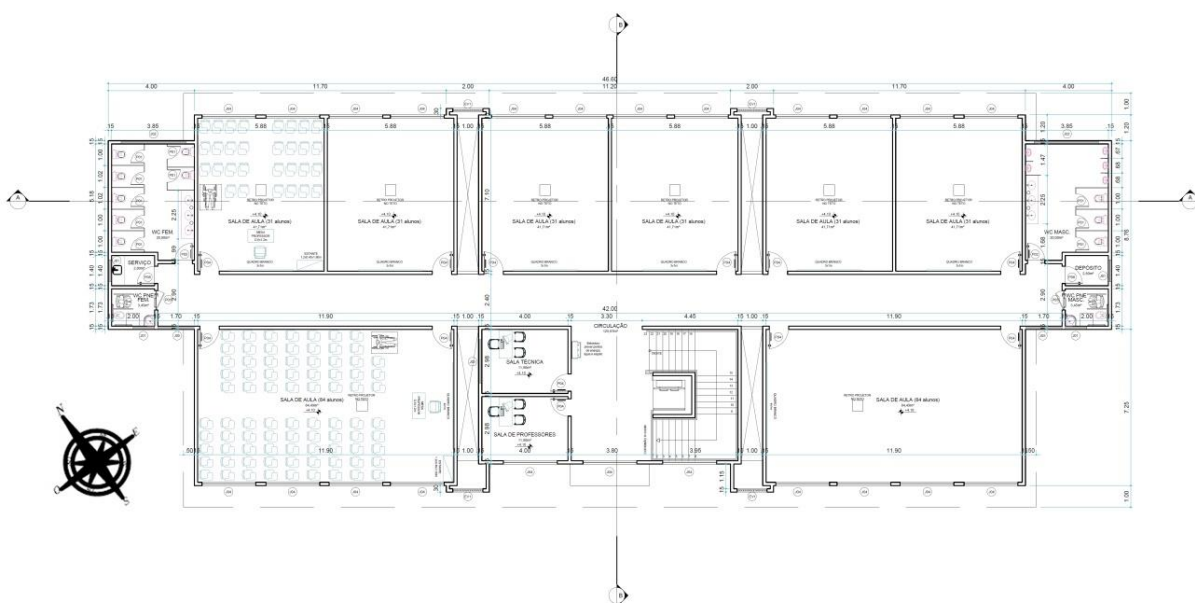


Figura 3. 15 – Planta Baixa: pavimento superior – Bloco de salas de aula de dois pavimentos



Fonte: Acervo SIN/UFERSA.

O acesso principal da edificação compreende uma esquadria de vidro no pavimento térreo, centralizada na fachada frontal (Figura 3. 16). Os fossos de serviço isolam as salas maiores em ambos os pavimentos e possuem cobertura elevada para favorecer a ventilação dos corredores (

Figura 3. 17). Os balanços do pavimento superior e da platibanda proporcionam à edificação um escalonamento vertical crescente (Figura 3. 18 e Figura 3. 19). A edificação possui quatros fossos de serviço (Figura 3. 20), que isolam as salas e permitem a passagem das instalações de água, energia e gás. Esses fossos também servem para a ventilação e iluminação dos corredores (Figura 3. 21), por meio de elementos vazados de concreto dispostos nas extremidades.

Figura 3. 16 – BSA2P - Fachada Frontal

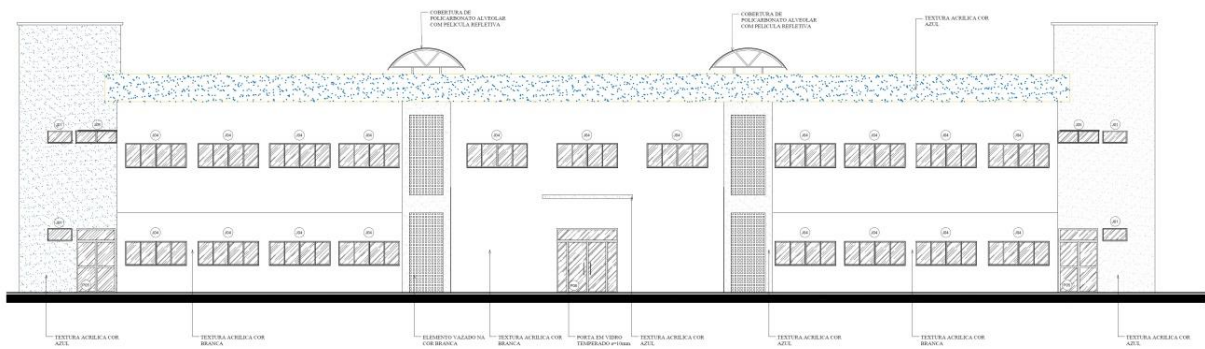


Figura 3. 17 – BSA2P - Corte longitudinal

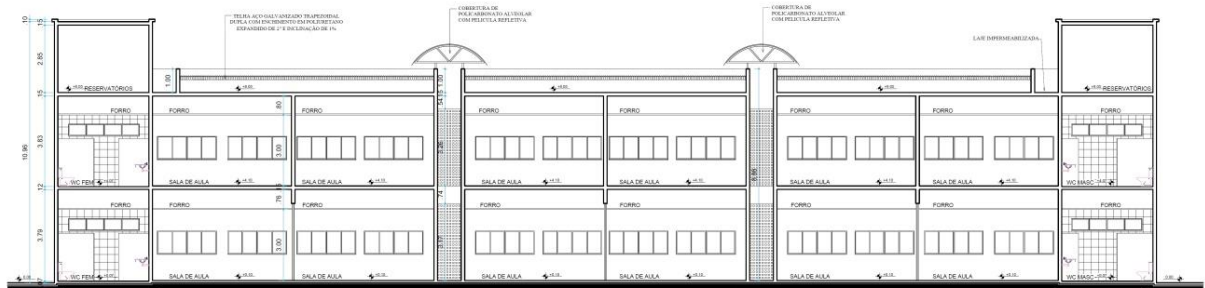


Figura 3. 18 – BSA2P – Fachada lateral

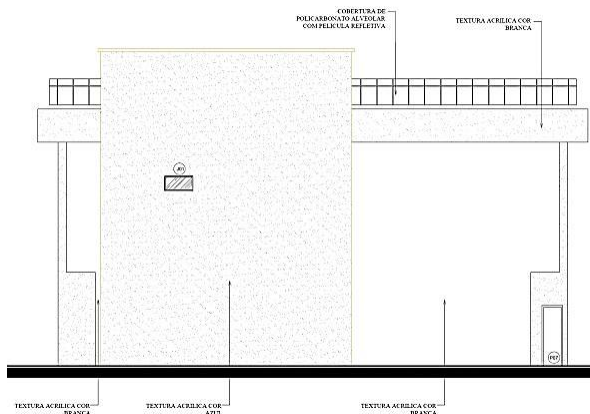
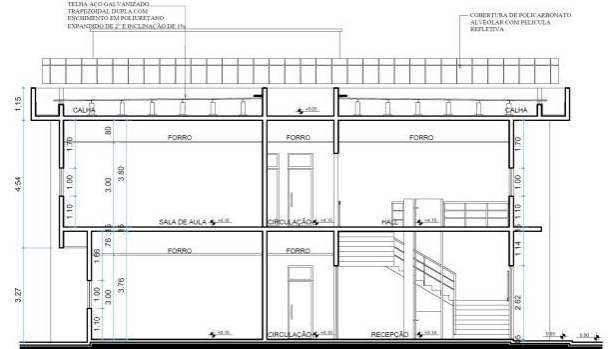


Figura 3. 19 – BSA2P – Corte transversal



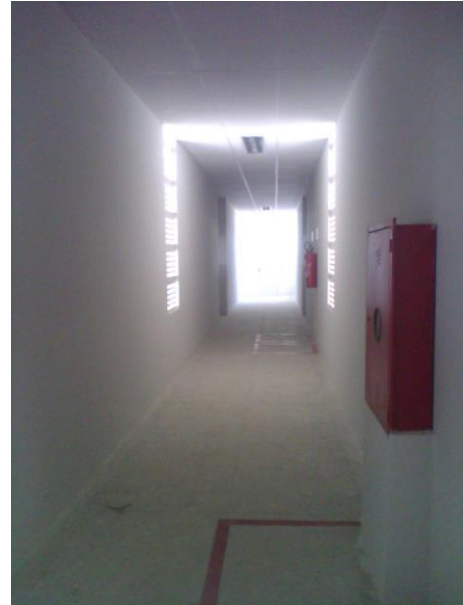
Fonte: Acervo SIN/UFERSA.

Figura 3. 20 – Vista interna do fosso de serviço



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3. 21 – Circulação horizontal [corredor] – detalhe do painel de cobogós do fosso



A escolha dessa edificação deveu-se a três motivos principais:

- a) Tecnicamente, trata-se de uma edificação construída e cujo projeto foi replicado com diferentes configurações de leiaute interno, porém sem alteração da volumetria. Além disso, o projeto contempla os fossos de serviço que permitem simular as salas isoladamente, sem interferência dos ambientes circunvizinhos. Essa característica atende à recomendação da IT 08/ 2010 (CBPMESP, 2010, p. 5), que considera as salas de aulas como ambientes autônomos, que necessitam estar compartimentados do restante da edificação, independentemente da sua dimensão;
- b) Profissionalmente, o estudo da edificação torna-se oportuno em função da possibilidade de aplicar os resultados dessa pesquisa nas edificações, mediante aprovação da reitoria da UFERSA;
- c) Operacionalmente, a opção por uma edificação na qual se tem total acesso aos projetos, memórias descritivos, registros fotográficos e possibilidade de vistoria *in loco*, facilita o trabalho de coleta de dados.

Quanto à replicação, o prédio (Figura 3. 22) possui, até o presente momento, cinco repetições. Três com a finalidade salas de aula nos campi da UFERSA em Mossoró/RN (Figura 3. 23), Pau dos Ferros/RN (Figura 3. 24) e Caraúbas/RN (Figura 3. 25); e duas adaptações para outras finalidades: Bloco de Laboratórios de

Ciência da Computação [LCC] (Figura 3. 26) e Bloco da Pró-reitoria de Graduação e do Núcleo de Ensino a Distância [PROGRAD/NEAD] (Figura 3. 27), ambos em construção no campus da UFERSA em Mossoró/RN.

Figura 3. 22 – BSA2P-I – Mossoró/RN



Figura 3. 23 – BSA2P-II – Mossoró/RN



Figura 3. 24 – BSA2P – Pau dos Ferros/RN



Figura 3. 25 – BSA2P – Caraúbas/RN



Figura 3. 26 – LCC – Mossoró/RN



Figura 3. 27 – PROGRAD/NEAD– Mossoró/RN



Fonte: Acervo SIN/UFERSA.

Apesar da volumetria permanecer a mesma, a divisão dos espaços internos varia consideravelmente em função do uso previsto para o prédio. O LCC contempla

no pavimento térreo: um auditório para 66 pessoas, duas salas de aulas para 31 alunos, um laboratório de informática para 40 alunos e quatro salas de pesquisa para até 25 pessoas. As salas do *hall* foram destinadas à coordenação e reunião (Figura 3. 28). No pavimento superior foram dispostos: três grandes laboratórios de informática, com 42 computadores cada e quatro laboratórios menores, para 20 máquinas. As salas do *hall* foram conjugadas para abrir espaço para uma sala de aula com 25 cadeiras (Figura 3. 29).

Figura 3. 28 – Planta Baixa: pavimento térreo – LCC

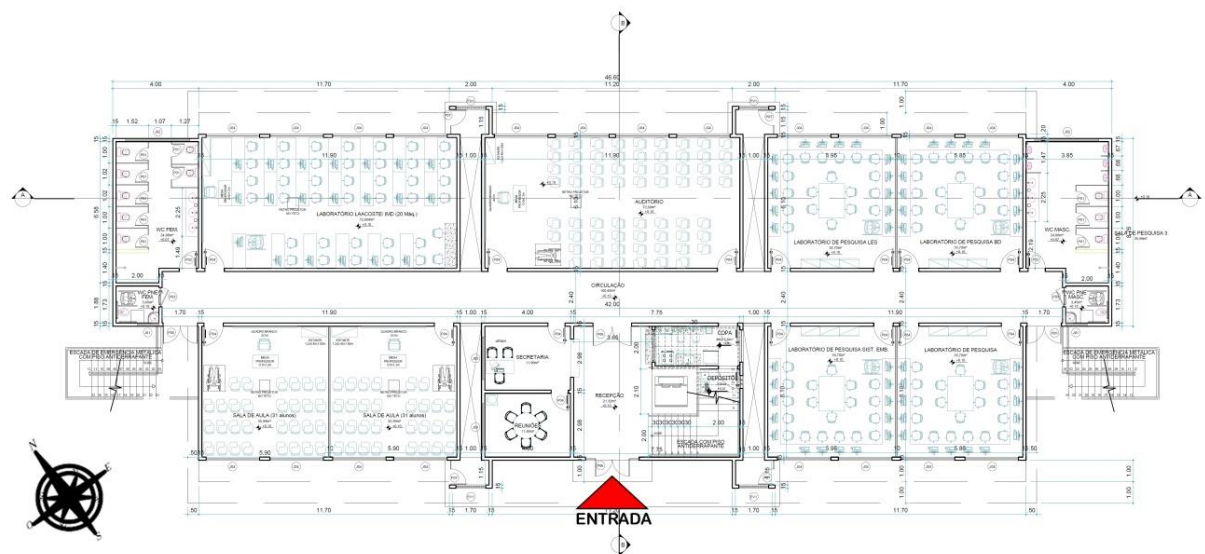
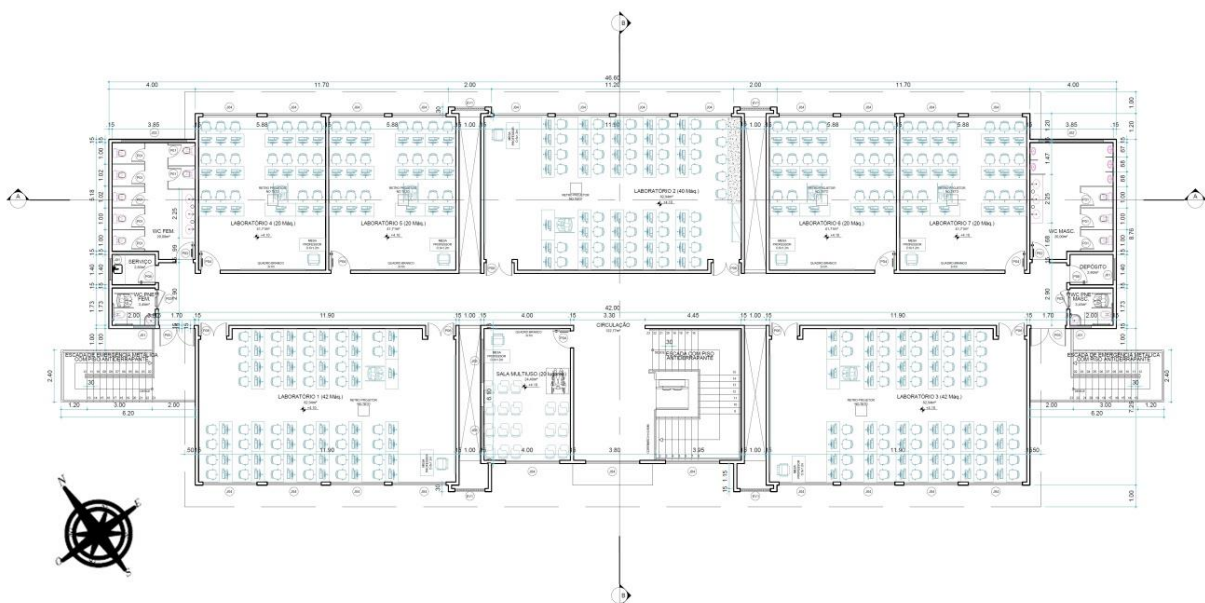


Figura 3. 29 – Planta Baixa: pavimento superior – LCC



Fonte: Acervo SIN/UFERSA.

Por sua vez, o prédio do PROGRAD/ NEAD possui no pavimento inferior: um auditório para 66 pessoas; um laboratório de informática para 35 computadores; duas salas pedagógicas; um estúdio de gravação e quatro salas menores para a coordenação dos cursos. As salas do hall foram destinadas a recepção e copa do prédio (Figura 3. 30). O pavimento superior contempla dezesseis pequenas salas de monitorias e um almoxarifado. A sala do hall foi destinada ao setor financeiro (Figura 3. 31).

Figura 3. 30 – Planta Baixa: pavimento térreo – PROGRAD/NEAD

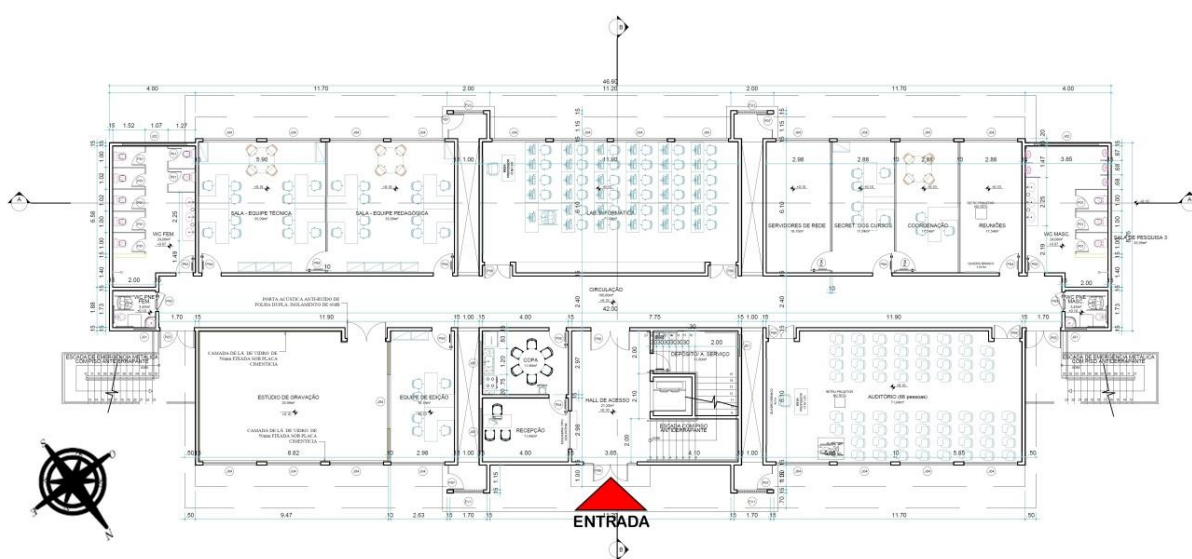
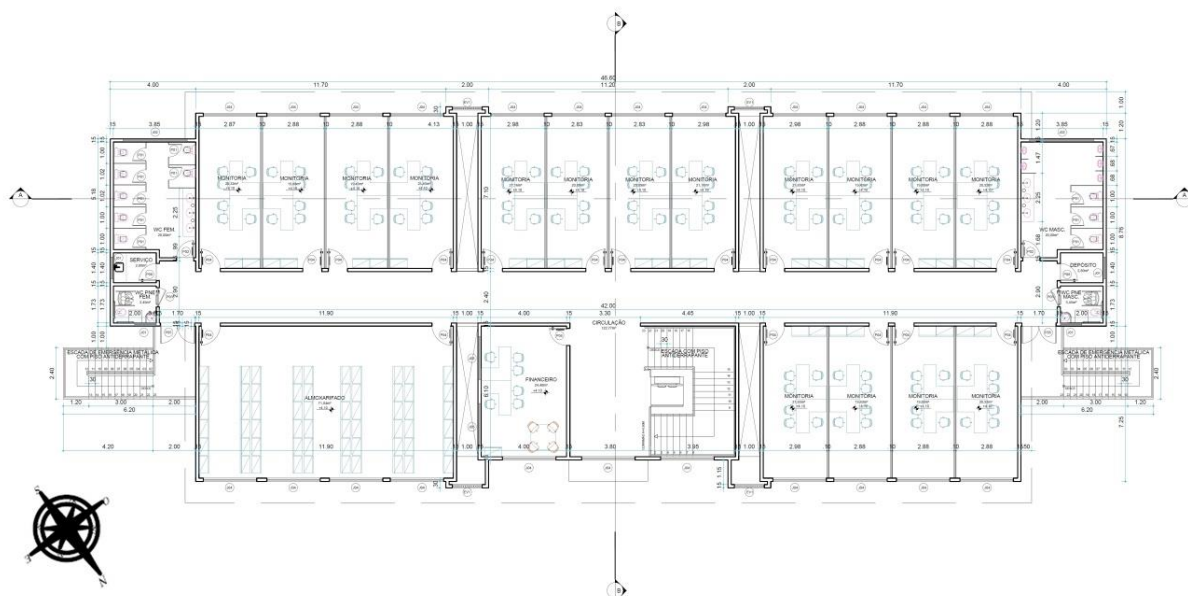


Figura 3. 31 – Planta Baixa: pavimento superior – PROGRAD/NEAD

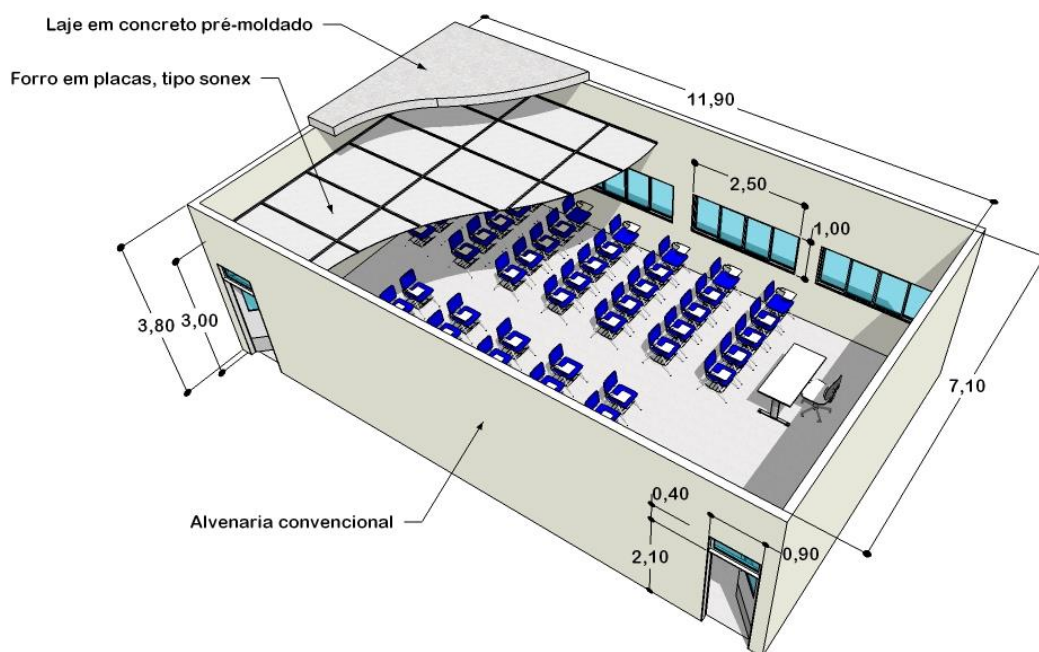


Fonte: Acervo SIN/UFERSA.

3.3 Definição do Modelo: Caso-base e variações

O modelo escolhido refere-se à sala de aula de maior dimensão, localizada no pavimento superior do BSA2P – SIN/UFERSA. A escolha desse ambiente deve-se à possibilidade de múltiplos leiautes, como pode ser confirmado tanto no projeto base quanto nos projetos derivados. Com base nas medidas e descrições do projeto arquitetônico, construiu-se um modelo, denominado por 'caso-base', como um prisma de base retangular, medindo 7,10 x 11,90 x 3,80 m [largura x comprimento x altura] (Figura 3. 32). Ainda conforme o projeto alocou-se as esquadrias: duas portas, medindo 0,90 x 2,10 m [largura x altura] e com bandeirola de vidro fixo de 0,40 m de altura, nas extremidades da parede voltada para o corredor central e quatro janelas, medindo 2,50 x 1,00 x 1,10 m [largura x altura x peitoril], dispostas na parede voltada para o meio externo. O forro é de placas termoacústicas removíveis, apoiadas sobre armação de alumínio. As paredes são de alvenaria convencional, com tijolos cerâmicos de oito furos, rebocadas e pintadas em ambas às faces. Piso e cobertura são de laje de concreto pré-moldado, tipo volterrana.

Figura 3. 32 – Representação esquemática do caso-base, de acordo com o projeto arquitetônico



O FDS só permite a construção de objetos em forma de prisma de base retangular, modelados a partir das coordenadas dos vértices. Trata-se de uma tarefa bastante laboriosa, principalmente em casos com grande quantidade de mobiliário.

Prevendo possíveis conflitos com a malha, a geometria dos objetos foi simplificada e as dimensões arredondadas para múltiplos de 0,05 m. Elementos demasiadamente delgados e, portanto, irrelevantes para o propósito da pesquisa foram ignorados. Em todos os casos adotou-se a mesa do professor como local de início do incêndio, por ser um dos elementos que não sofre deslocamento em função do leiaute da sala e por acomodar o computador.

A partir do caso-base [CB], foram considerados 17 variações de subdivisão do ambiente original. O primeiro caso, doravante denominado 'DIV' representou a situação mais comum, na qual o ambiente é dividido ao meio por uma divisória simples, posicionada transversalmente no centro da sala. Os casos 'CB' e 'DIV' serviram como referência para a avaliação do desempenho dos demais casos, os quais representam propostas de compartimentação horizontal seletiva.

A compartimentação horizontal seletiva resultou da disposição de duas divisórias paralelas providas de aberturas posicionadas próximas ao forro, voltadas alternadamente para as salas geradas a partir da subdivisão do ambiente original. O vão entre as divisórias foi dividido ao meio para evitar que a fumaça gerada em um ambiente invadisse a sala oposta. Por fim, foram concebidas duas aberturas na laje, uma sobre cada fosso gerado entre as divisórias, para a exaustão da fumaça (Figura 3. 33 e Figura 3. 34).

Figura 3. 33 – Compartimentação seletiva: vista superior

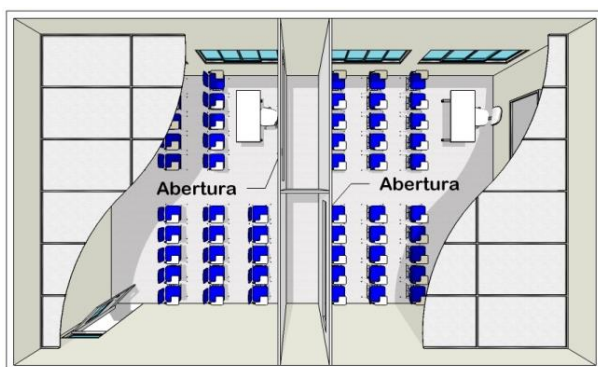


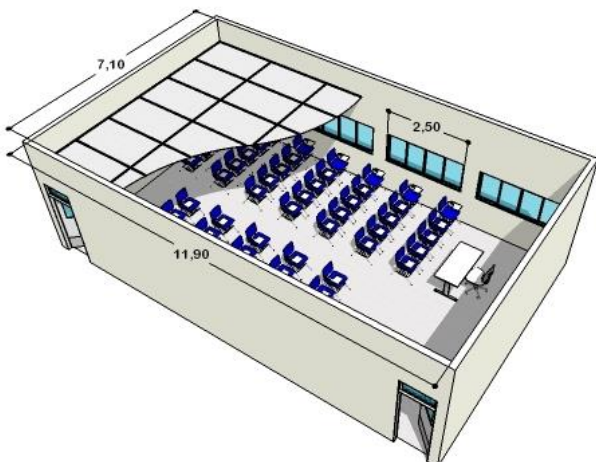
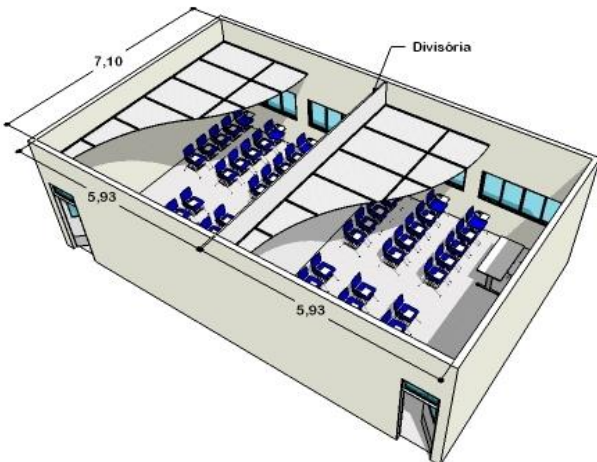
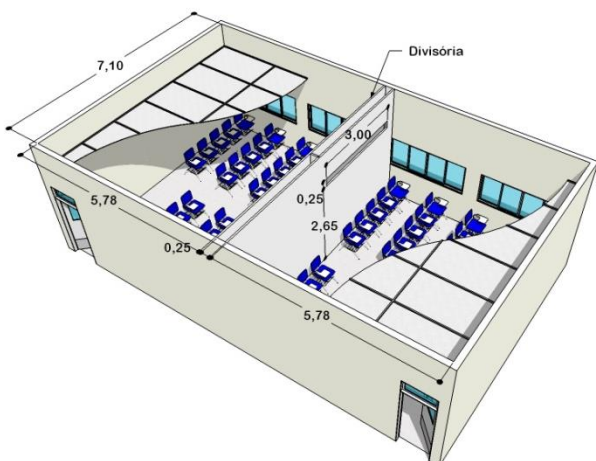
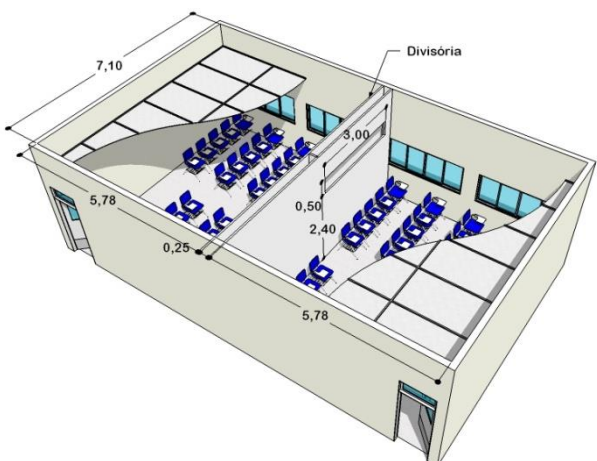
Figura 3. 34 – Compartimentação seletiva: secção frontal

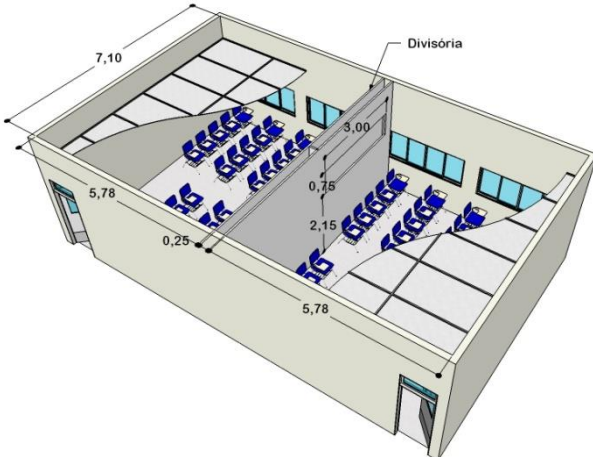
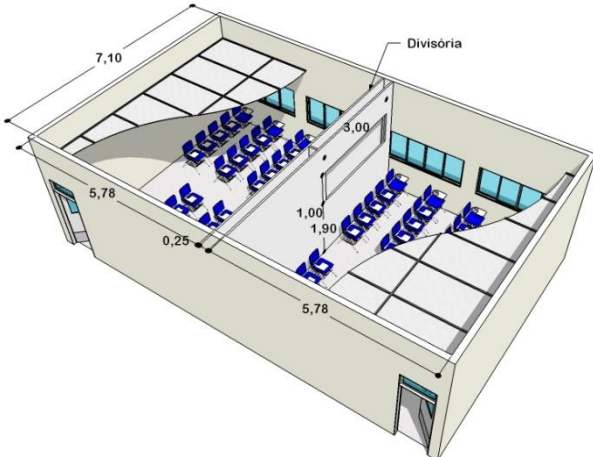
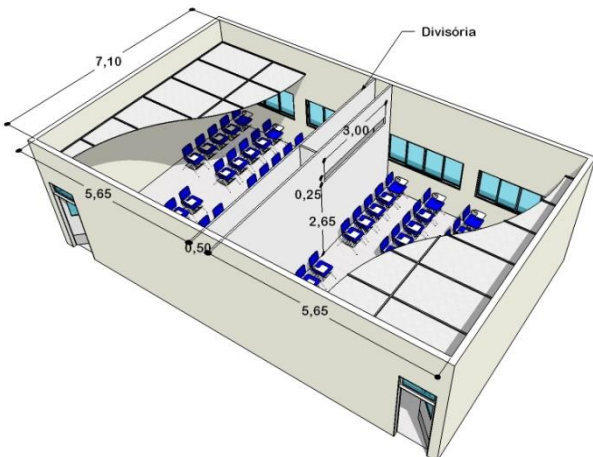
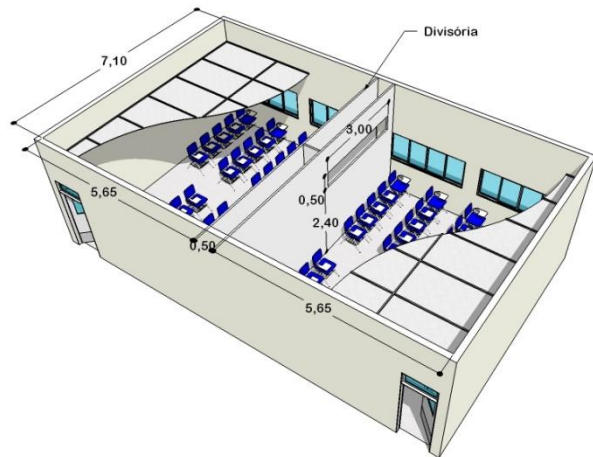


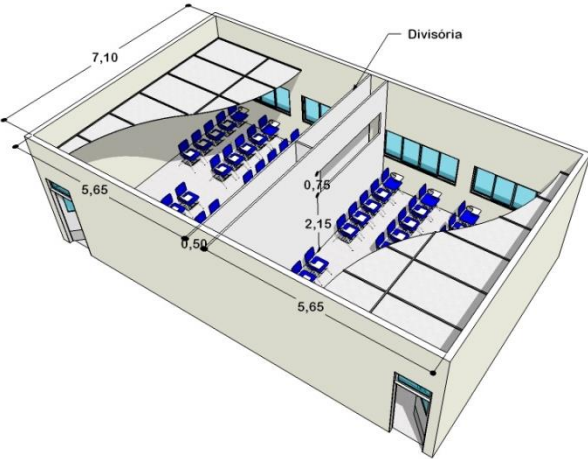
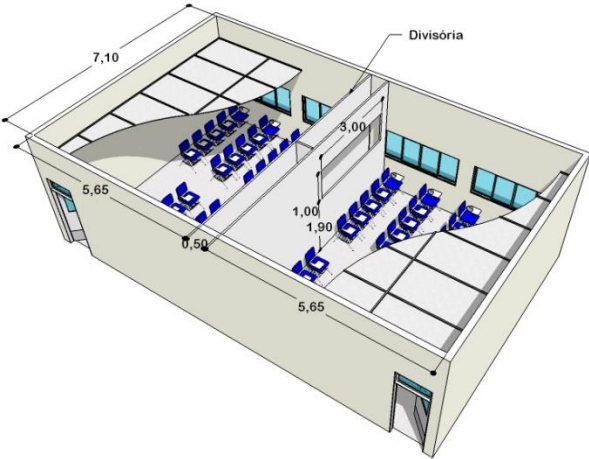
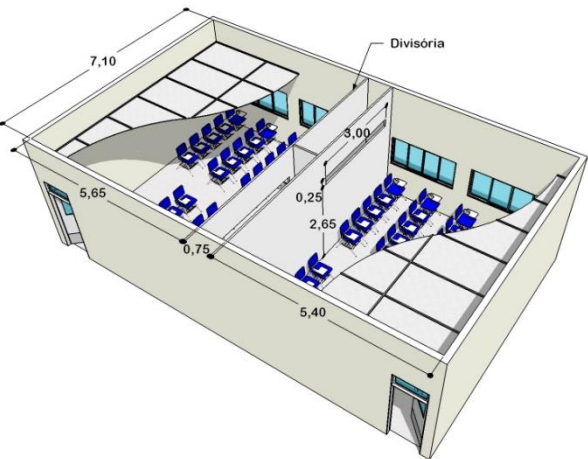
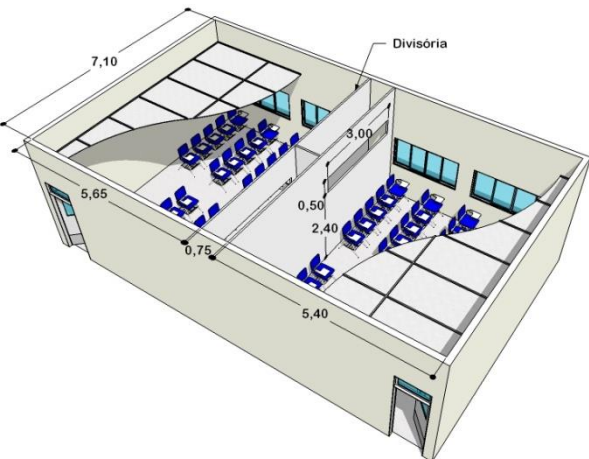
O dimensionamento da abertura na divisória e do vão na laje foi realizado com base em quatro medidas: 0,25 m; 0,50 m; 0,75 m e 1,00 m. A largura da abertura na divisória e o comprimento do vão na laje permaneceram inalterados em todos os casos, medindo 3,00 m. Dessa maneira, os dezesseis casos de

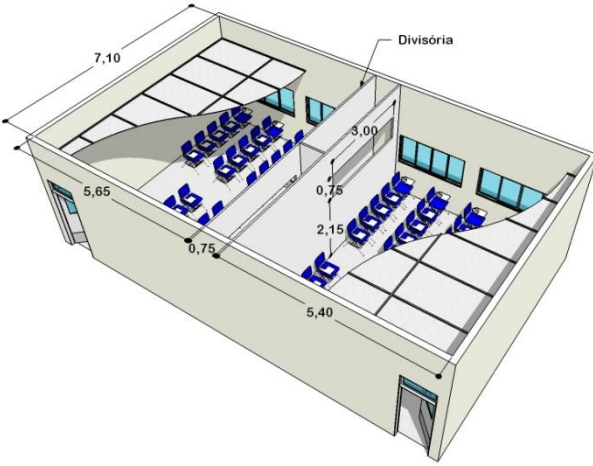
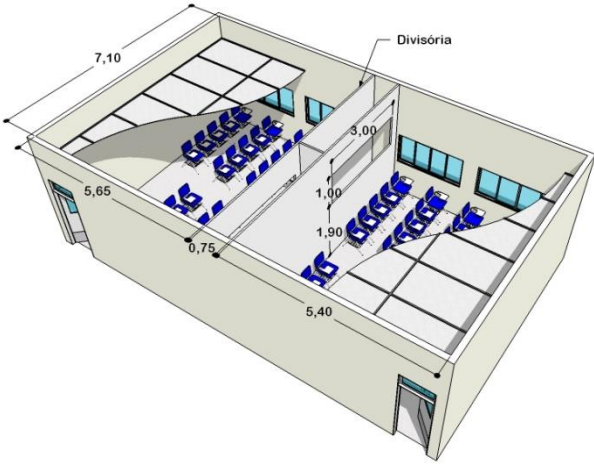
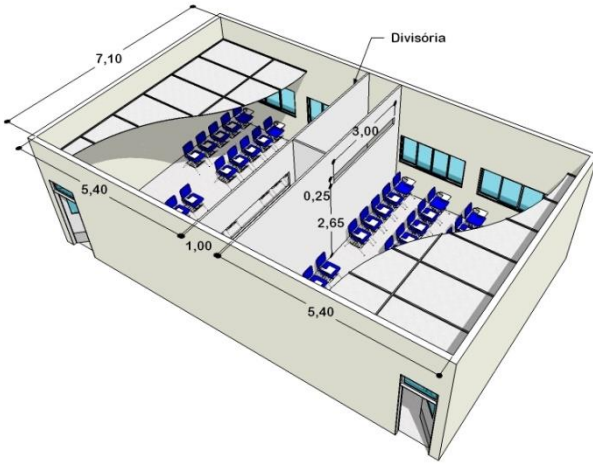
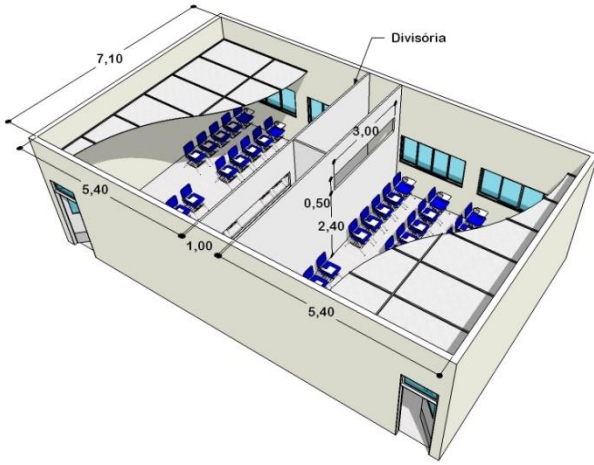
compartimentação seletiva correspondem às combinações possíveis entre as quatro alturas da abertura na divisória e as quatro larguras do vão da laje. Em todos os casos, foram simuladas duas situações, considerando as esquadrias do ambiente incendiado fechadas ou abertas [identificados pela terminação ‘_open’]. Na Tabela 3. 2 descrevem-se resumidamente os casos simulados.

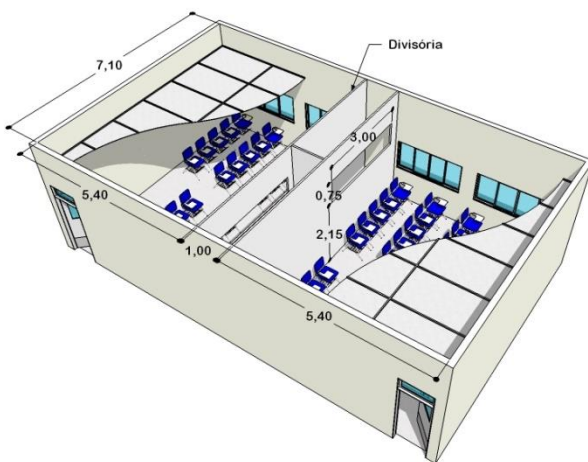
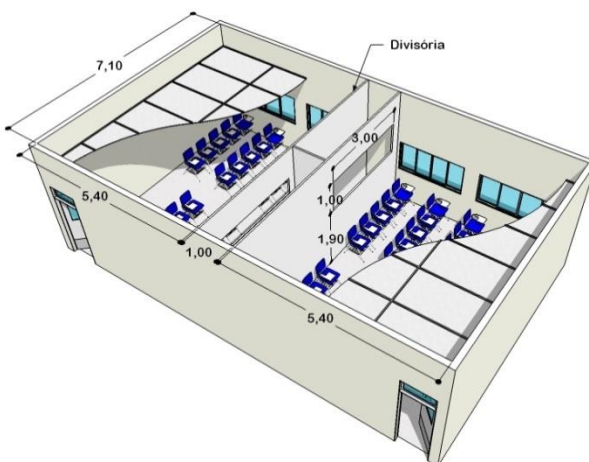
Tabela 3. 2 – Casos Simulados

CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Figura 3. 35 – Representação dos casos ‘CBplus’ e ‘CBplus_open’  Descrição: Corresponde ao caso-base, descrito no tópico anterior: sala com dimensões internas de 11,90 x 7,10 m, livre de subdivisões internas.	Figura 3. 36 – Representação dos casos ‘DIV’ e ‘DIVplus_open’  Descrição: caso-base com uma divisória transversal central
Figura 3. 37 – Representação dos casos ‘25-25plus’ e ‘25-25plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 0,25 m.	Figura 3. 38 – Representação dos casos ‘25-50plus’ e ‘25-50plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,50 m e largura do vão na laje = 0,25 m.

CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Figura 3. 39 – Representação dos casos '25-75plus' e '25-75plus_open'  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,75 m e largura do vão na laje = 0,25 m.	Figura 3. 40 – Representação dos casos '25-100plus' e '25-100plus_open'  Descrição: Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 0,25 m.
Figura 3. 41 – Representação dos casos '50-25plus' e '50-25plus_open'  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 0,50 m.	Figura 3. 42 – Representação dos casos '50-50plus' e '50-50plus_open'  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,50 m e largura do vão na laje = 0,50 m.

CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Figura 3. 43 – Representação dos casos ‘50-75plus’ e ‘50-75plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,75 m e largura do vão na laje = 0,50 m.	Figura 3. 44 – Representação dos casos ‘50-100plus’ e ‘50-100plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 0,50 m.
Figura 3. 45 – Representação dos casos ‘75-25plus’ e ‘75-25plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 0,75 m.	Figura 3. 46 – Representação dos casos ‘75-50plus’ e ‘75-50plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,50 m e largura do vão na laje = 0,75 m.

CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Figura 3. 47 – Representação dos casos ‘75-75plus’ e ‘75-75plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,75 m e largura do vão na laje = 0,75 m.	Figura 3. 48 – Representação dos casos ‘75-100plus’ e ‘75-100plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 0,75 m.
Figura 3. 49 – Representação dos casos ‘100-25plus’ e ‘100-25plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 1,00 m.	Figura 3. 50 – Representação dos casos ‘100-50plus’ e ‘100-50plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,50 m e largura do vão na laje = 1,00 m.

CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Figura 3. 51 – Representação dos casos ‘100-75plus’ e ‘100-75plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 0,75 m e largura do vão na laje = 1,00 m.	Figura 3. 52 – Representação dos casos ‘100-100plus’ e ‘100-100plus_open’  Descrição: Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 1,00 m.

3.4 Critérios de Análise

A questão temporal é imprescindível em uma situação de incêndio, uma vez que o processo de combustão se desenvolve rapidamente diante de condições favoráveis. Do ponto de vista operacional, o intervalo adotado na simulação computacional precisa ser definido com bastante critério, pois impacta diretamente no tempo de processamento. Considerando o interesse da pesquisa na proteção dos ocupantes de uma edificação em situação de incêndio, o emprego do TRRF como critério de análise tornou-se inadequado, uma vez que se trata de uma grandeza voltada à resistência dos elementos construtivos submetidos a temperaturas inviáveis para a manutenção da vida. Ou seja, quando a temperatura do ambiente incendiado atinge valor suficiente para comprometer a integridade do material, a possibilidade de escape ou resgate dos ocupantes já se extinguiu.

Esse raciocínio encontra embasamento em Pannoni e Silva (2008), que afirmam:

“Em uma análise relativa à segurança à vida, feita para avaliar a habilidade dos ocupantes de desocupar o compartimento de origem do incêndio, somente as fases incipiente e de crescimento serão de relevância. Após a inflamação generalizada ou fase de incêndio completamente desenvolvido

não mais se considera a possibilidade de desocupação” (PANNONI; SILVA *In: SEITO [coord.] et al., 2008, p. 418*).

A opinião é compartilhada, também, por Mitidieri (*In: Ibid., 2008, p. 60*) ao afirmar que na fase de inflamação generalizada, caracterizada pela temperatura acentuadamente elevada, a sobrevivência no recinto torna-se impossível. Por fim, Silva (2004) afirma que em um incêndio “as mortes acontecem principalmente por asfixia e nos primeiros minutos do sinistro” (SILVA, 2004, p. 67). Logo, as simulações buscaram reproduzir os cinco minutos iniciais de um incêndio, ou seja, o intervalo correspondente à fase de aquecimento.

Diante do exposto, ficou evidente que a pesquisa deveria se ater a simular os instantes iniciais do incêndio. Partiu-se, então, em busca de referências que indicassem o intervalo adequado ao propósito do estudo, considerando-se as limitações dos recursos computacionais disponíveis. Experimentos monitorados em tempo real indicam que em incêndios não explosivos o *flashover* acontece, normalmente, no intervalo de até cinco minutos após o surgimento da chama-piloto (MOUNT PENN FIRE COMPANY, 2015 e FPA, 2012). Ainda na questão temporal, Cunha e Martinelli Jr. (*In: op. cit., 2008, p. 265*) afirmam que ambientes reduzidos podem ser completamente tomados pela fumaça em menos de três minutos, mesmo na ocorrência de incêndios de pequena proporção. Desse modo, os modelos foram configurados para simular os cinco primeiros minutos do incêndio.

Estabelecido o intervalo de simulação, optou-se por adotar como critério de análise as duas grandezas responsáveis por ocasionar vítimas em uma situação de incêndio: fumaça e temperatura. De acordo com Negrissolo (2011), países que empregam códigos de incêndio baseados no desempenho, a exemplo da Nova Zelândia, já possuem o entendimento de que o controle da fumaça é o cerne da SCI na proteção dos ocupantes. Assim, um dos critérios de avaliação foi a altura da camada livre de fumaça²¹, que designa o espaço onde é possível os ocupantes respirarem e enxergarem as sinalizações da rota de fuga. A parte 5 da IT 15/ 2011 recomenda que “uma altura livre de fumaça deve ser projetada de forma a garantir o escape das pessoas” (CBPMESP, 2011, p. 370) e para isso estipula a altura mínima

²¹ Também denominada por ‘camada visível’.

da camada visível em 2,50 m acima do piso de escape. De modo complementar, o segundo critério foi o gradiente vertical de temperatura, ou seja, a elevação temporal de temperatura em cotas pré-estabelecidas ao longo de um eixo vertical.

3.5 Teste de sensibilidade

O teste sensibilidade consistiu em simulações prévias para verificar o comportamento do *software* diante das características do modelo e das condições de contorno adotadas. Os resultados obtidos nesse teste serviram de guia para as simulações definitivas, pois é a partir dele que são realizados os ajustes das variáveis descritas no arquivo de entrada de dados, em busca da melhor relação: representatividade dos resultados x tempo de processamento.

Conforme citado no item 3.1.2, a malha consiste na completa subdivisão do domínio em células justapostas. No teste de sensibilidade adotou-se um domínio com medidas superiores ao modelo nos eixos Y e Z, de modo a permitir a visualização o deslocamento da fumaça caso ela viesse a transpor as aberturas. Assim, o modelo foi posicionado a 2,40 m a partir da origem na direção do eixo Y, simulando a largura do corredor de acesso à sala (Figura 3. 53 e Figura 3. 54). Ainda na direção do eixo das ordenadas, prolongou-se o domínio em 5,00 m, contados a partir da parede que comporta as janelas, para simular o meio externo. No eixo Z, arbitrou-se a altura do domínio em 7,00 m, considerando o movimento ascendente típico dos gases aquecidos.

Figura 3. 53 – Vista anterior do caso-base no teste de sensibilidade

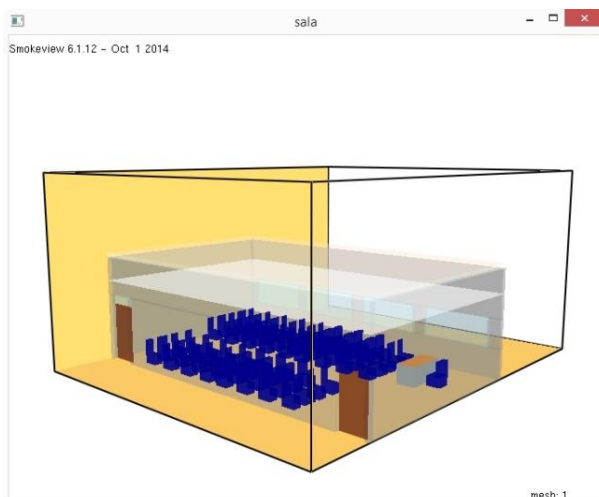


Figura 3. 54 – Vista posterior do caso-base no teste de sensibilidade



Levando-se em consideração as medidas do modelo e os acréscimos citados, o domínio empregado no teste de sensibilidade apresentou as seguintes dimensões: 12,2 x 15,0 x 7,0 m [eixos X; Y; Z, respectivamente]. Adotou-se a mesa do professor como foco do incêndio, para a qual foi atribuída uma taxa de liberação de calor de 500 kW, que corresponde a um valor intermediário entre os índices adotados por Fakury; Caldas e Branco (2011) e Alves (2011). Na Tabela 3. 3 resume-se²² as condições de contorno adotadas no teste de sensibilidade.

Tabela 3. 3 – Configuração inicial do caso base

DOMÍNIO [EIXOS CARTESIANOS X; Y; Z] (m)	HRR (kW)	COMPOSTO QUEIMANTE	FRAÇÃO DO COMPOSTO TRANSFORMADA EM FUMAÇA [SOOT_YIELD]	TEMPO (s)
12,2; 15,0; 7,0	500	Poliuretano padrão do FDS	50%	60

Um dos principais objetivos do teste de sensibilidade consistiu na busca pela adequada definição da malha. O calculador de malha *on-line* (OVERHOLT, 2007) apresentou três possibilidades de malha, resumidas na Tabela 3. 4, a partir da inserção das dimensões do domínio e da taxa de liberação de calor adotada.

Tabela 3. 4 – Dimensionamento da malha

CLASSIFICAÇÃO DA MALHA / EIXOS	EIXO X	EIXO Y	EIXO Z	TOTAL DE CÉLULAS
Grosseiro ['coarse'] dx=0,182 m	72	90	40	259.200
Moderado ['moderate'] dx=0,073 m	180	216	96	3.732.480
Fina ['fine'] dx=0,045 m	270	360	160	15.552.000

Fonte: Overholt (2007), Adaptado.

A malha classificada como 'grosseira' propôs células com dimensões lineares de aproximadamente 0,18 m. Isso significa que os elementos com dimensão inferior a esse valor, como a espessura das esquadrias, por exemplo, poderiam ser ignorados ou mal interpretados pelo *software*. A opção pela malha 'moderada' reduzia a medida linear para aproximadamente 0,07 m, porém aumentava em 14 vezes a quantidade de células. Aparentemente a malha 'fina' poderia ser compreendida como a ideal pra o estudo em curso, pois apresentou dimensão linear

²² Os valores de algumas condições de contorno adotadas pelo FDS foram mantidos, como por exemplo: gravidade, pressão atmosférica, densidade do ar, temperatura inicial, dentre outros.

inferior à largura mínima adotada nos objetos presentes no modelo. Contudo, tal refinamento implicou em uma quantidade de células mais de 60 vezes superior à configuração ‘grosseira’.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Discussão preliminar

O mero emprego da malha sugerida pelo calculador *on-line* não significa garantia de sucesso na simulação. O teste de sensibilidade revelou que a malha grosseira era incapaz de reconhecer o objeto sobre o qual a chama foi alocada²³, cuja espessura é de 0,05 m. O não reconhecimento do objeto é constatado na mensagem de erro que aparece no primeiro instante do processamento do arquivo de entrada de dados, abortando a simulação (Figura 4. 1).

Figura 4. 1 – Falha na inicialização por malha demasiadamente espaçada



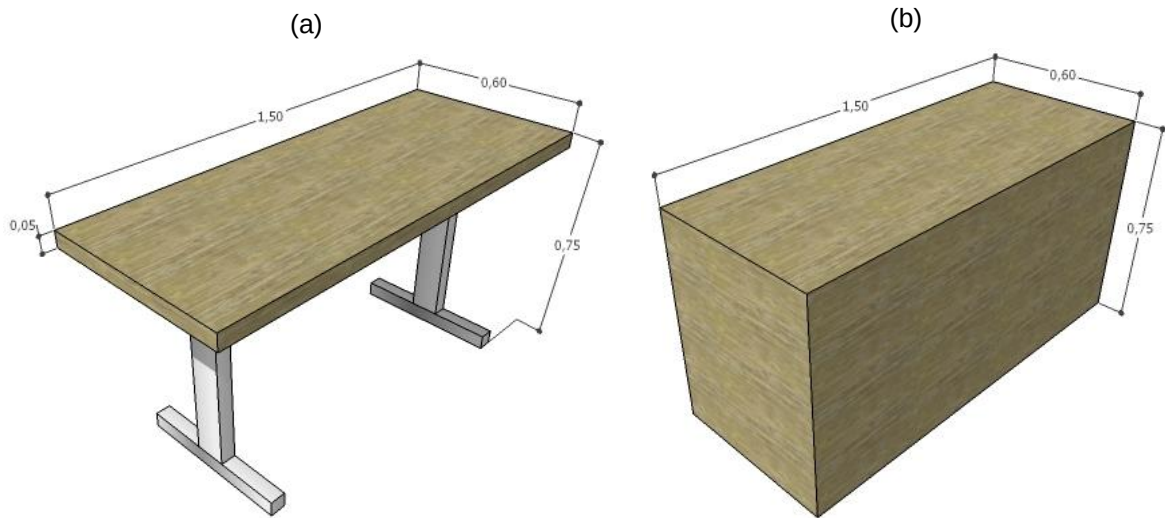
```

Administrador: Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\WINDOWS\system32>cd ..
C:\Windows>cd ..
C:\>d:
D:\>cd doutorado
D:\doutorado>cd modelo01
D:\doutorado\modelo01>fds6 sala.fds
OpenMP thread 1 of 4 is running
OpenMP thread 4 of 4 is running
OpenMP thread 3 of 4 is running
OpenMP thread 2 of 4 is running
ERROR: VENT 1 must be attached to a solid obstruction <CHID: sala>
STOP: FDS was improperly set-up <CHID: sala>
STOP: FDS was improperly set-up <CHID: sala>
D:\doutorado\modelo01>_
  
```

A solução encontrada para a realização do teste de sensibilidade com a malha grosseira foi a simplificação do elemento que servia de base para as chamas. Assim, os cinco objetos que compunham um sólido em formato de mesa foram substituídos por um único objeto, preservando-se a área da superfície queimante (Figura 4. 2).

²³ No FDS, as chamas são inseridas como uma superfície, denominada “VENT”, dotada de uma HRRPUA. Contudo, esse elemento precisa, obrigatoriamente, estar atrelada a um objeto sólido, designadas no arquivo de entrada de dados pelas linhas de comando iniciadas por “&OBST”.

Figura 4. 2 – Objeto inicialmente previsto para suportar as chamadas (a) e a simplificação necessária para utilização da malha grosseira (b)



O emprego da malha fina impossibilitava o processamento da simulação nos computadores disponíveis²⁴. A mensagem de erro relatando a falta de memória surgia imediatamente após o comando de início, cancelando automaticamente a simulação (Figura 4. 3). Segundo Gissi (2010) A velocidade do processador determina o tempo de cálculo, enquanto a quantidade de memória RAM indica a quantidade de células suportada. O autor afirma também que os atuais computadores pessoais [*desktops*] são capazes de suportar malhas com apenas alguns poucos milhões de células. De fato, o resumo do tempo de processamento das simulações, apresentado na Tabela 4. 1, evidencia como os recursos computacionais disponíveis condicionam o refinamento de malha suportado. Ou seja, ficou claro como a definição da malha não pode atender apenas para os aspectos de ordem teórica, uma vez que é fortemente influenciada por limitações operacionais.

²⁴ Os computadores disponíveis para processar as simulações foram: Um desktop com processador de 3,5 GHz e 4 GB de memória RAM, um notebook com processador Core i7® 2,30 GHz e 8,00 GB de memória RAM e dois notebooks com processador Core i5® 2,50 GHz e 4,00 GB de memória RAM.

Figura 4. 3 – Falha na inicialização decorrente do uso de malha demasiadamente refinada

```

Administrador: Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\WINDOWS\system32>cd ..
C:\Windows>cd ..
C:\>cd doutorado
C:\doutorado>cd modelo01
C:\doutorado\modelo01>fds5 sala.fds
ERROR: Memory allocation failed for HS in the routine INIT
ERROR: Memory allocation failed for HS in the routine INIT
C:\doutorado\modelo01>

```

Tabela 4. 1 – Resultado do teste de sensibilidade do caso base

CLASSIFICAÇÃO DA MALHA	TOTAL DE CÉLULAS	TEMPO DE SIMULAÇÃO
Grosseira ['coarse']	259.200	2 h 30 min
Moderada ['moderate']	3.732.480	120 h 46 min (aprox. 5 dias)
Fina ['fine']	15.552.000	Não rodou

Considerando a impossibilidade de executar as simulações com a malha fina e o tempo exigido pela malha moderada, os testes preliminares foram realizados empregando-se a malha denominada 'grosseira'. Os resultados dos testes preliminares são apresentados no Apêndice A. A respeito da representatividade dos resultados obtidos com malhas pouco refinadas, conforta saber que Manz; Xu e Seymour (2002, p. 3) afirmam não perceber alteração significativa nos resultados ao refinar a malha no FDS durante a simulação de um incêndio em um quarto de hotel.

Apesar das questões operacionais observadas durante os testes preliminares, o FDS mostrou-se adequado ao propósito da pesquisa. Ficou evidente o substancial incremento no tempo de processamento provocado por definições refinadas de malha. Diante desse entrave, surgiram duas possibilidades em prol de uma redução significativa na quantidade de células: adotar uma malha mais espaçada ou reduzir o domínio.

A adoção de uma malha mais espaçada do que aquela tida como ‘grosseira’ pelo próprio manual do usuário teria pelo menos dois efeitos indesejáveis: primeiro o aumento na incerteza dos resultados e segundo a necessidade de uma simplificação ainda maior na geometria dos objetos para eles fossem percebidos pela malha. Diante da intenção de utilizar uma definição de malha entre a ‘grosseira’ e a ‘moderada’, o espaçamento da malha foi descartado.

Optou-se, então, por reduzir as dimensões do domínio, ajustando-o ao modelo. Desse modo foram eliminados 6,60 m nos recuos no eixo das ordenadas e 3,00 m de espaço vazio sobre o modelo no eixo Z. Como a largura do domínio coincidia com a da sala, não houve redução no eixo das abscissas. Descreve-se na Tabela 4. 2 a comparação das configurações de malha adotadas nos teste preliminares e nas simulações com o modelo aperfeiçoado.

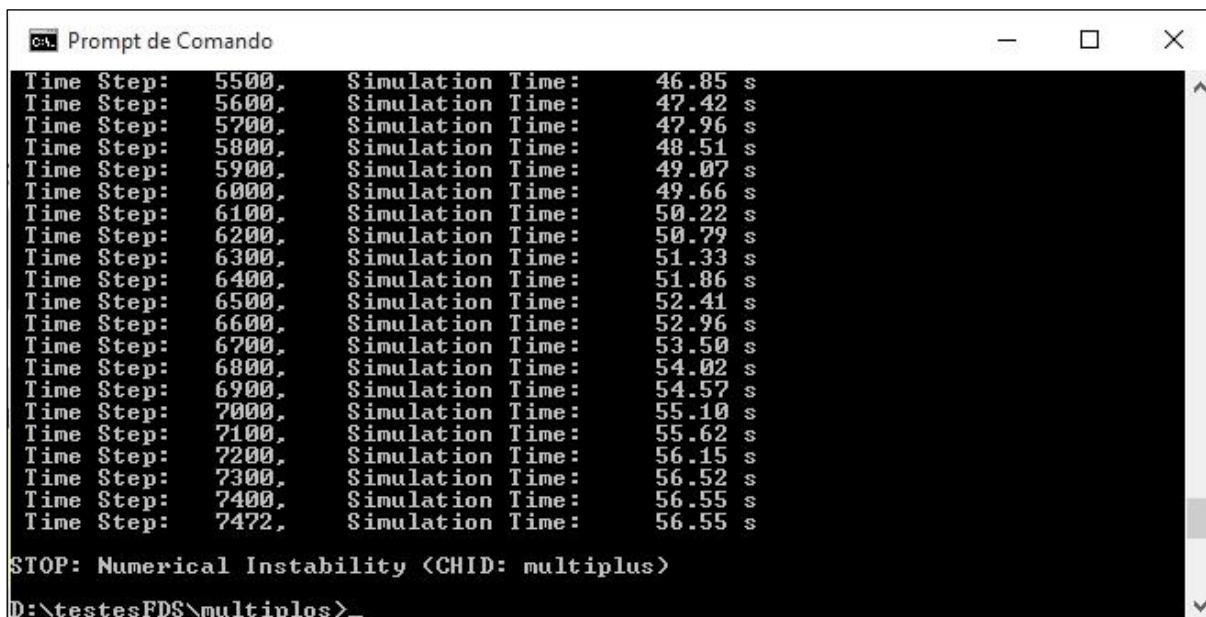
Tabela 4. 2 – Configurações de domínio e malha dos casos-base original [CB] e aperfeiçoado [CBplus]

CASO	DIMENSÕES DO DOMÍNIO [X; Y; Z] (m)	MALHA (*)	dx (m)	QNT. DE CÉLULAS POR EIXO [X; Y; Z]	TOTAL DE CÉLULAS
CB	12,2; 15,0; 7,0	Grosseira	0,182	72; 90; 40	259.200
		Moderada	0,073	180; 216; 96	3.732.480
		Fina	0,045	270; 360; 160	15.552.000
CBplus	12,2; 8,4; 4,0	Grosseira	0,182	72; 48; 24	82.944
		Moderada	0,073	180; 120; 60	1.296.000
		Fina	0,045	270; 192; 90	4.665.600

(*) As configurações de malha foram obtidas com o uso do ‘*Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator*’ (OVERHOLT, 2007).

Acreditava-se que a redução do domínio permitiria o processamento das simulações com a malha ‘moderada’. Contudo, todas as tentativas com essa configuração de malha revelaram-se frustradas, em função da instabilidade numérica identificada pelo *software* durante o processamento (Figura 4. 4).

Figura 4. 4 – Erro no processamento do caso-base [CBplus] com malha ‘moderada’.



```

C:\> Prompt de Comando

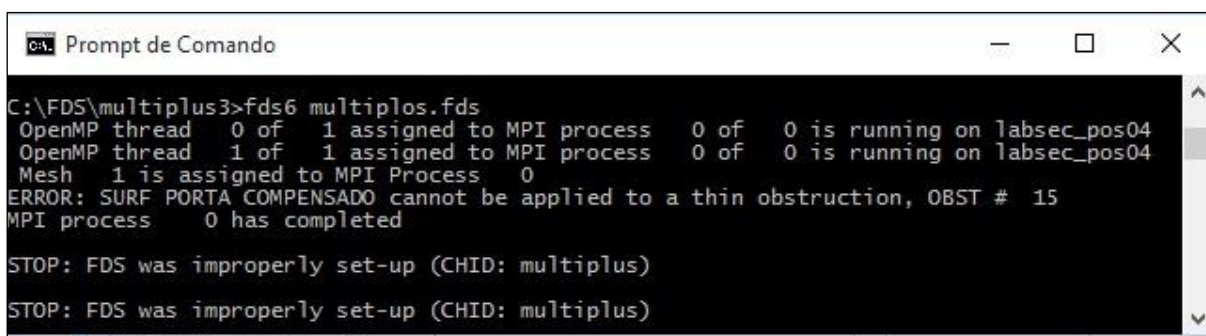
Time Step: 5500, Simulation Time: 46.85 s
Time Step: 5600, Simulation Time: 47.42 s
Time Step: 5700, Simulation Time: 47.96 s
Time Step: 5800, Simulation Time: 48.51 s
Time Step: 5900, Simulation Time: 49.07 s
Time Step: 6000, Simulation Time: 49.66 s
Time Step: 6100, Simulation Time: 50.22 s
Time Step: 6200, Simulation Time: 50.79 s
Time Step: 6300, Simulation Time: 51.33 s
Time Step: 6400, Simulation Time: 51.86 s
Time Step: 6500, Simulation Time: 52.41 s
Time Step: 6600, Simulation Time: 52.96 s
Time Step: 6700, Simulation Time: 53.50 s
Time Step: 6800, Simulation Time: 54.02 s
Time Step: 6900, Simulation Time: 54.57 s
Time Step: 7000, Simulation Time: 55.10 s
Time Step: 7100, Simulation Time: 55.62 s
Time Step: 7200, Simulation Time: 56.15 s
Time Step: 7300, Simulation Time: 56.52 s
Time Step: 7400, Simulation Time: 56.55 s
Time Step: 7472, Simulation Time: 56.55 s

STOP: Numerical Instability (CHID: multiplos)
D:\testesFDS\multiplos>

```

Diante da inoperabilidade gerada pela malha ‘moderada’ e ciente do sucesso obtido com a malha ‘grosseira’ nos testes preliminares, optou-se por aplicar a malha ‘grosseira’ aos casos com domínio redimensionado. Todavia o resultado não foi satisfatório. A malha passou a ignorar sucessivamente os objetos de espessura reduzida. Diversos ajustes foram realizados na geometria dos objetos, mas a mensagem de erro indicando a impossibilidade de aplicar certo material em um determinado objeto persistia (Figura 4. 5), interrompendo a simulação ainda na etapa de leitura do arquivo de entrada de dados.

Figura 4. 5 – Erro no processamento do caso-base [CBplus] com malha ‘grosseira’.



```

C:\FDS\multiplos3>fds6 multiplos.fds
OpenMP thread 0 of 1 assigned to MPI process 0 of 0 is running on labsec_pos04
OpenMP thread 1 of 1 assigned to MPI process 0 of 0 is running on labsec_pos04
Mesh 1 is assigned to MPI Process 0
ERROR: SURF PORTA COMPENSADO cannot be applied to a thin obstruction, OBST # 15
MPI process 0 has completed

STOP: FDS was improperly set-up (CHID: multiplos)
STOP: FDS was improperly set-up (CHID: multiplos)

```

O insucesso no uso da malha ‘grosseira’ reforçou a intenção de empregar uma configuração intermediária de malha, de modo a conciliar a definição dos objetos com tempo de processamento. Seguindo a indicação de Gissi (2010, p. 60), adotou-se uma malha com dimensão linear de 0,10 m nos três eixos cartesianos,

totalizando 409.920 células. Essa configuração se mostrou adequada para o modelo, resultando em um tempo de processamento de 6 dias, 16 horas e 37 minutos para o caso-base.

Esse nível de refinamento de malha permitiu um aperfeiçoamento da geometria dos objetos contidos no modelo, realizada com o objetivo representar com maior fidelidade os objetos reais. Foi melhorada a geometria dos seguintes componentes: carteira escolar (Figura 4. 6 e Figura 4. 7), cadeira do professor (Figura 4. 8), mesa do professor (Figura 4. 9) e o forro de placas removíveis.

Figura 4. 6 – Exemplo de geometria simplificada representativa de uma carteira escolar e cadeira do professor, compatível com malha ‘grosseira’.

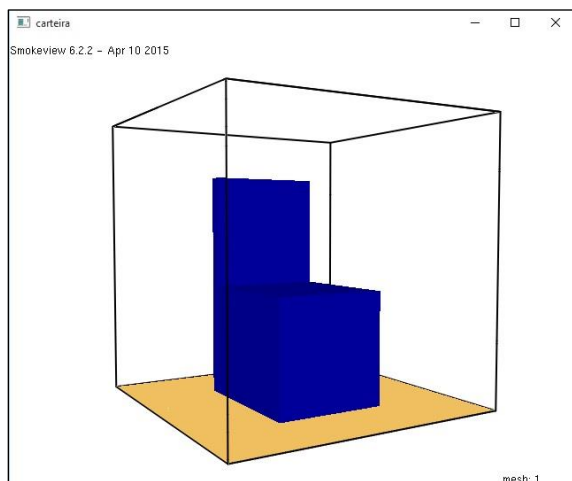


Figura 4. 7 – Aperfeiçoamento da geometria representativa de uma carteira escolar, compatível com malha de 0,10 m.

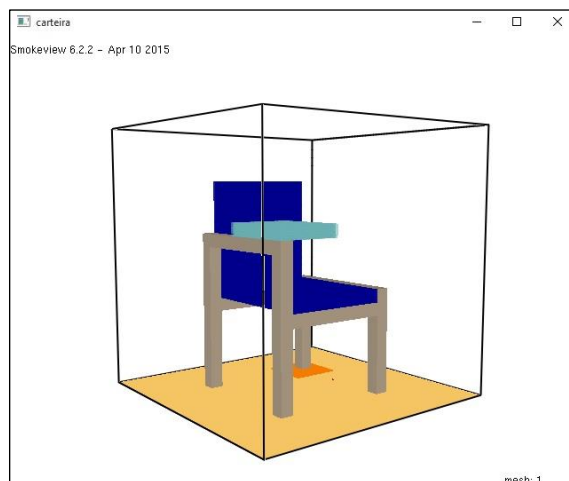


Figura 4. 8 – Aperfeiçoamento da geometria representativa da cadeira do professor, compatível com malha de 0,10 m.

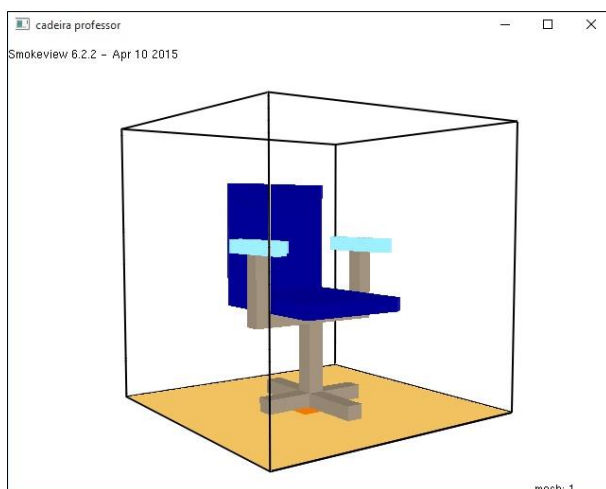


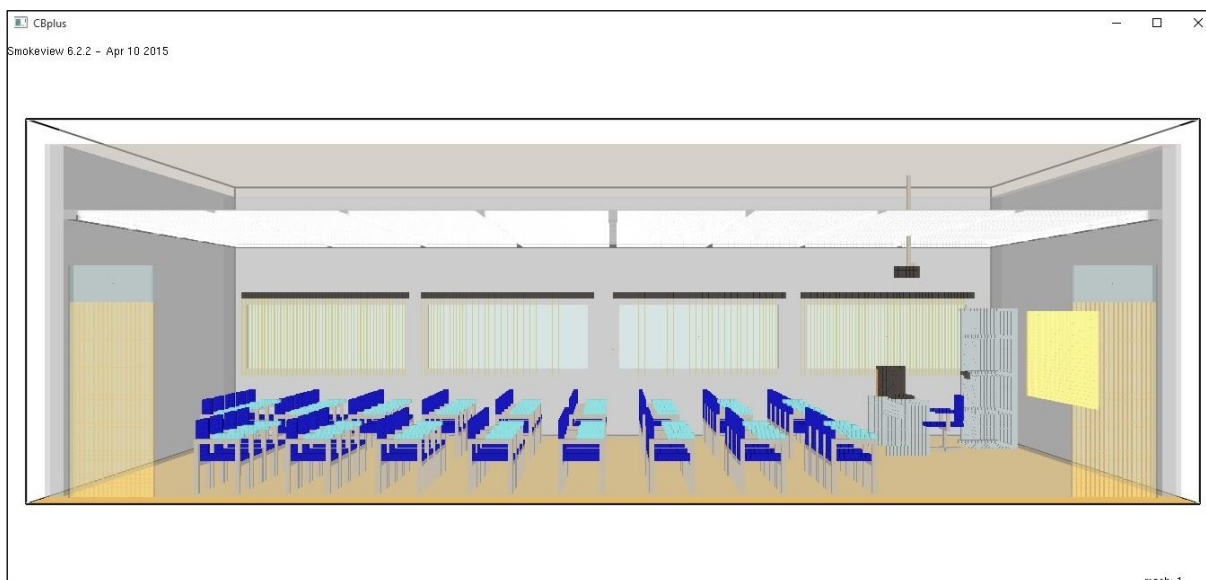
Figura 4. 9 – Aperfeiçoamento da geometria representativa da mesa do professor, compatível com malha de 0,10 m.



A possibilidade de aperfeiçoamento da geometria dos objetos, proporcionada pela malha 10 x 10 cm, instigou a inserção de outros itens do

mobiliário, tais como: armário, *datashow*, suporte do *datashow*, computador sobre a mesa do professor, quadro-negro afixado à parede e cortinas persianas em frente às janelas (Figura 4. 10). A inclusão desses objetos não foi motivada por interesses meramente estéticos, a intenção foi aproximar a simulação de uma situação real.

Figura 4. 10 – Vista do caso-base aperfeiçoado – ‘CBplus’.



A utilização de alguns recursos desconhecidos por ocasião dos testes preliminares, tais como os comandos “&MULTI”; “&DUMP DT_RESTART” e “&MISC RESTART”, revelaram-se úteis na modelagem de objetos repetidos e por permitirem salvar e pausar a simulação, reiniciando-a posteriormente a partir daquele ponto.

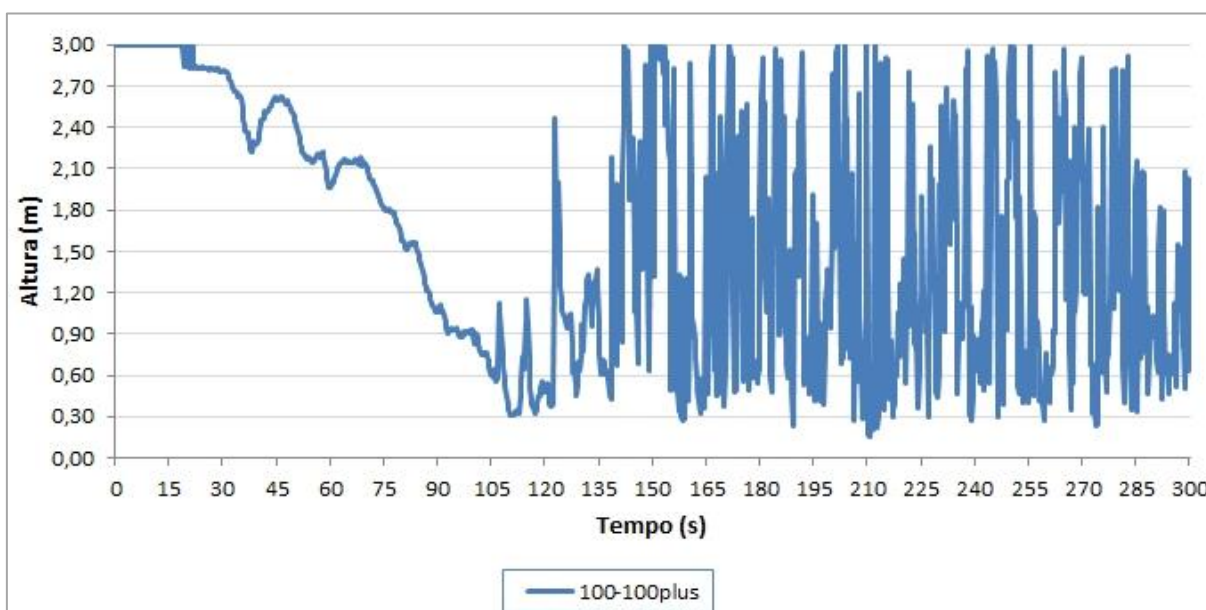
Além do incremento na geometria dos objetos, foram introduzidos aperfeiçoamentos no modelo, tais como:

- a. O comando “BURN_AWAY” foi ativado para todos os materiais combustíveis, permitindo que eles iniciassem o processo de pirólise ao atingir a temperatura de ignição;
- b. Inclusão do comando “RAMP_Q” para gerar um crescimento paulatino da chama. Adotaram-se os valores referentes ao “Crescimento médio de incêndio” (Tabela 2. 2, pág. 30), obtidos a partir da equação 2. 2, retirada da norma britânica BS 3974/2001, conforme citado no item 2.1 do presente trabalho.
- c. Inclusão do comando “DEVC_ID” que permite impor uma ação a determinado objeto em função do comportamento de alguma variável. No caso específico,

- determinou-se que as superfícies de vidro desaparecessem ao atingir 500 °C (GIACOMINI, 2004), simulando o efeito de quebra;
- d. Correção do valor atribuído ao parâmetro “SOOT_YELD”, que determina a fração do composto convertida em fumaça durante a combustão, para 5% (ROBBINS; WADE, 2007, p. 13.);
 - e. Temperatura inicial ajustada para 25 °C, por meio do parâmetro “&MISC TMPA=25”.

Todavia, a comparação dos resultados obtidos a partir dos casos aperfeiçoados [caracterizados pela designação ‘plus’] revelou que o ajuste do domínio ao modelo interferiu na exaustão da fumaça proporcionada pela compartimentação seletiva. Nos casos com as janelas fechadas, a compilação gráfica dos dados tabulados gerados pelo FDS mostrou um comportamento anômalo da camada livre de fumaça após os 100 primeiros segundos de simulação, quando a altura da camada de fumaça aproxima-se do piso. Esse tipo de comportamento se repetiu para diversas combinações de aberturas na divisória e na laje. De acordo com os gráficos gerados, é como se a camada livre de fumaça oscilasse alternadamente entre valores mínimos e máximos a cada segundo nos dois terços finais da simulação (Figura 4. 11).

Figura 4. 11 – Curva típica da altura da camada livre de fumaça dos casos com as janelas fechadas.



Entretanto, a visualização promovida pelo *Smokeview* não corroborava esse comportamento oscilatório da camada livre de fumaça. O que se observava era que

após o preenchimento da sala por fumaça nos primeiros 100 segundo (Figura 4. 12), não havia mais variação dessa condição (Figura 4. 13).

Figura 4. 12 – Visualização do caso ‘100-100plus’ aos 102 seg.

Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014



Frame: 340
Time: 102.0
mesh: 1

Figura 4. 13 – Visualização do caso ‘100-100plus’ aos 204 seg.

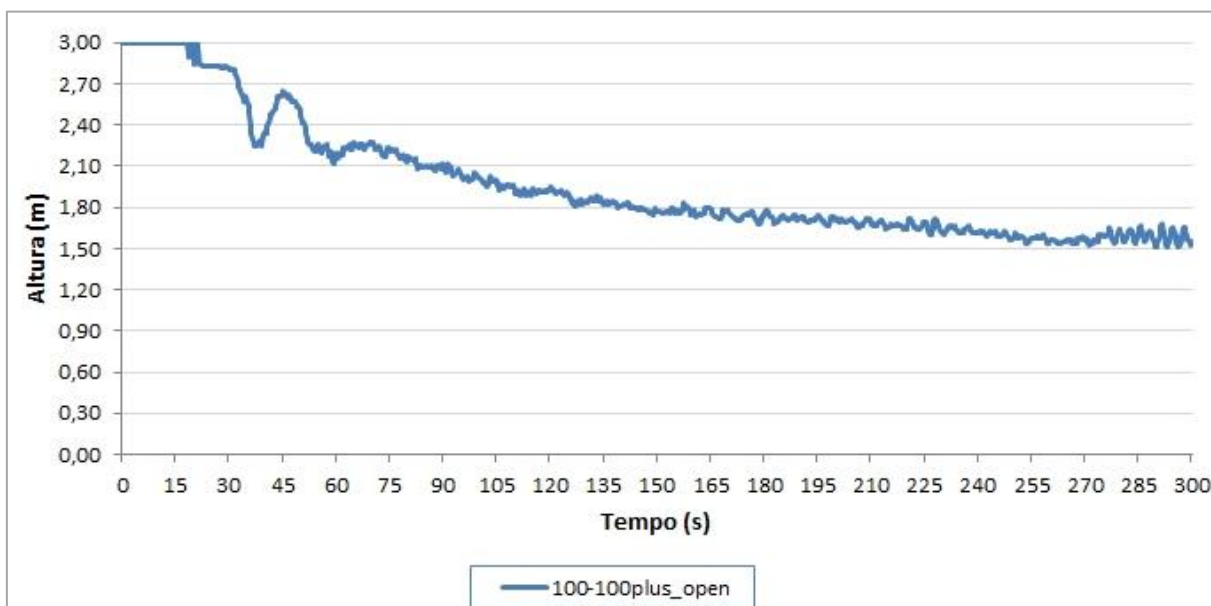
Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014



Frame: 690
Time: 204.0
mesh: 1

O mesmo comportamento não ocorria nos casos simulados com as janelas abertas. Os gráficos revelavam o comportamento da camada livre de fumaça coerente com a visualização promovida pelo *Smokeview*. Ou seja, um decaimento paulatino que tende a se estabilizar sobre a cota de 1,10 m, que equivale a aproximadamente o peitoril da janela (Figura 4. 14).

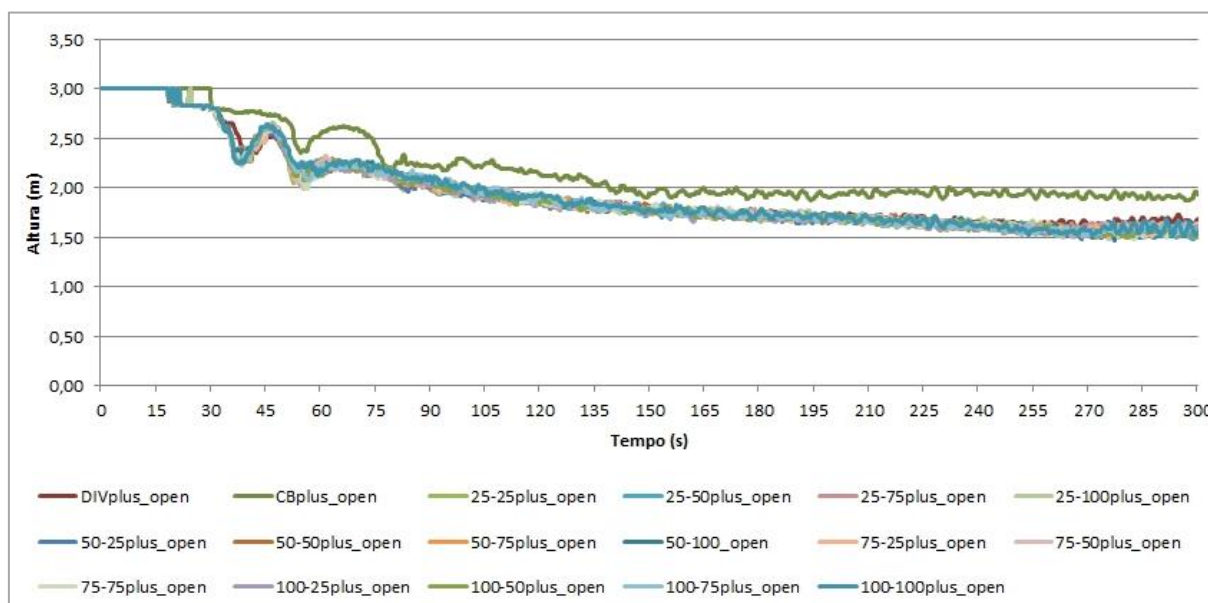
Figura 4. 14 – Curva típica da altura da camada livre de fumaça dos casos com as janelas abertas.



Entretanto, a compilação dos resultados de todos os casos simulados com as janelas abertas sobre um mesmo gráfico revelou a sobreposição das curvas, com exceção daquela que representa o caso ‘CBplus’. Ou seja, todos os casos providos com a compartimentação seletiva obtiveram o mesmo desempenho do caso ‘DIVplus’, que representa a subdivisão da sala da forma mais tradicional, por meio

de uma divisória simples (Figura 4. 15). Essa sobreposição das curvas revelou que estava ocorrendo algum tipo de discordância entre o modelo, a malha e o domínio, pois o programa não estava conseguindo interpretar a abertura na laje como um vão para a exaustão da fumaça. De fato, se qualquer combinação de aberturas na divisória e na laje tinha exatamente o mesmo comportamento do caso ‘DIVplus’ é porque toda a exaustão estava acontecendo exclusivamente pelas janelas.

Figura 4. 15 – Sobreposição das curvas representativas da altura da camada livre de fumaça dos casos com as janelas abertas.



Comportamento irregular também foi observado nos gráficos do gradiente vertical de temperatura. Nos casos simulados com as janelas fechadas, a temperatura aumentava simultaneamente em todos os pontos de medição dispostos sobre um eixo vertical posicionado no centro geométrico da sala incendiada. Esse comportamento acentuava-se principalmente a partir da segunda metade do período simulado, refutando a existência de camadas térmicas bem definidas (Figura 4. 16).

Ao dispor em um mesmo gráfico os resultados de temperatura referentes à cota de 1,80 m, percebeu-se, novamente, a proximidade das curvas representativas dos casos providos de compartimentação seletivas com o caso de referência ‘DIVplus’. Uma pequena diferença entre os resultados era notada apenas no terço final da simulação (Figura 4. 17).

Figura 4. 16 – Curva típica do gradiente vertical de temperatura dos casos com as janelas fechadas.

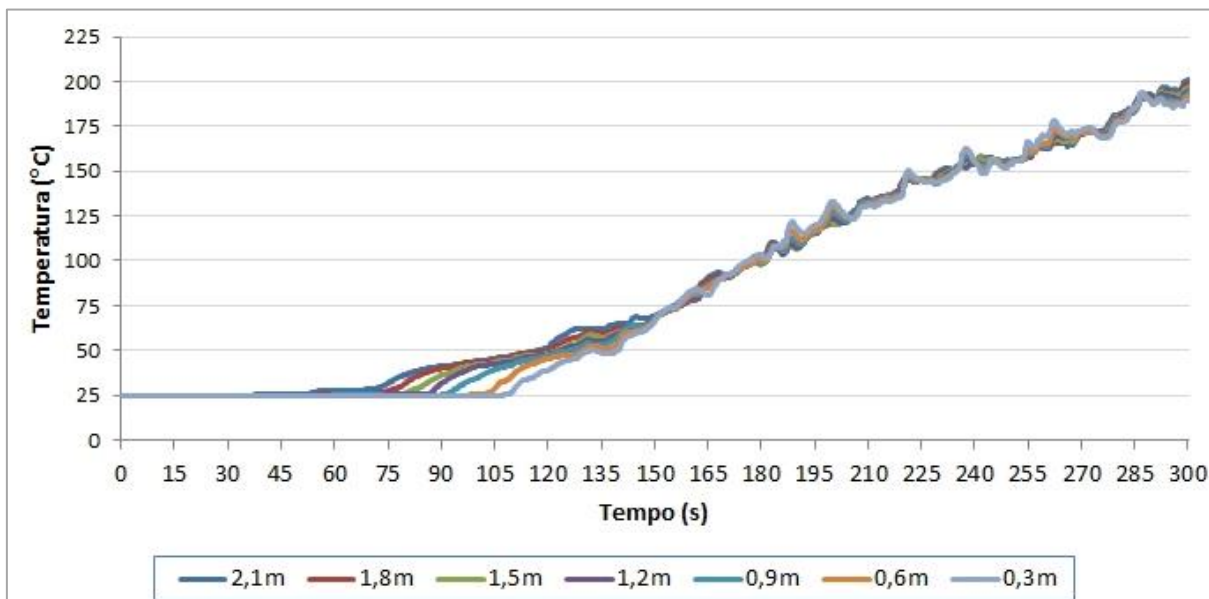
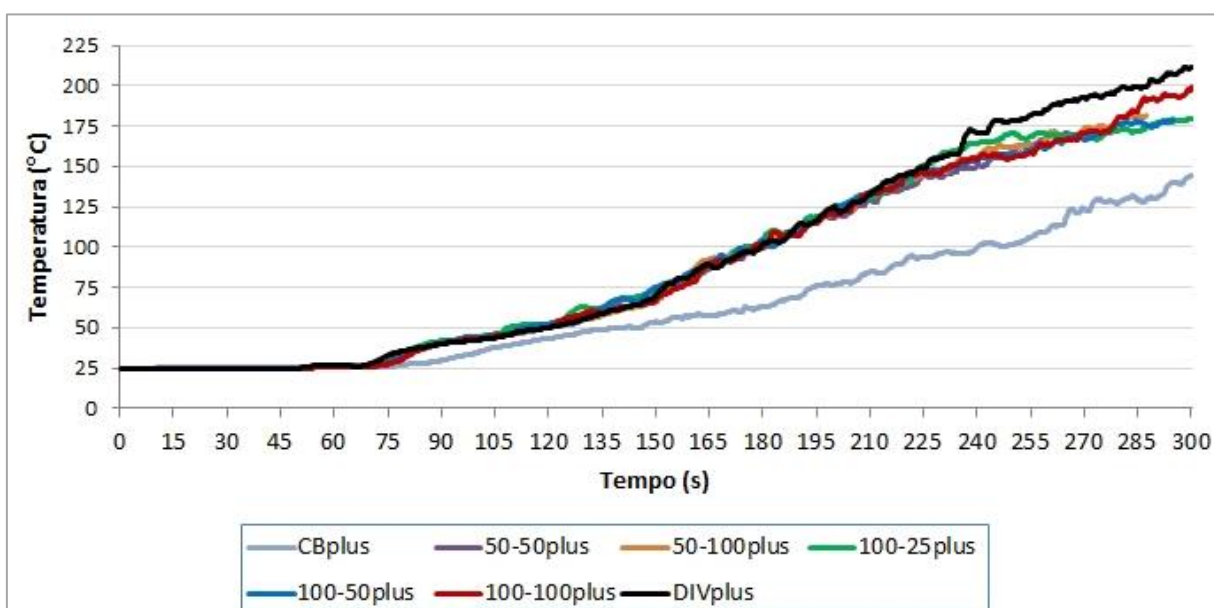
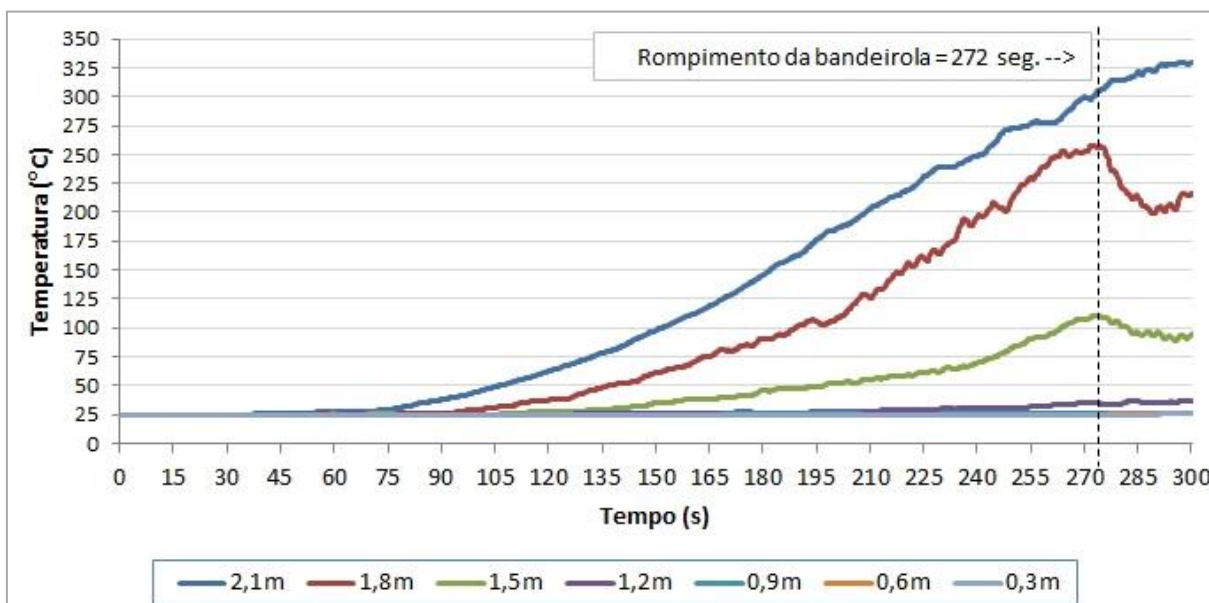


Figura 4. 17 – Sobreposição das curvas representativas do gradiente vertical de temperatura dos casos com as janelas fechadas na cota de 1,80 m.



Por outro lado, os resultados gráficos dos casos simulados com as janelas abertas revelou um gradiente vertical de temperatura bem definido, com elevação de temperatura distinta em cada cota pré-estabelecida (Figura 4. 18).

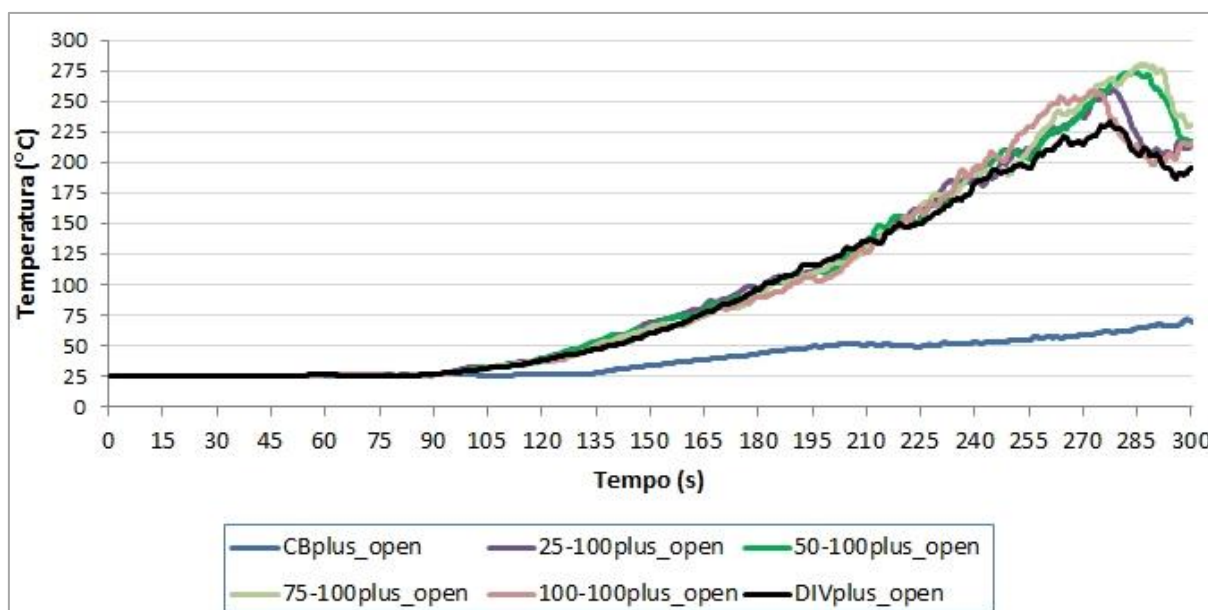
Figura 4. 18 – Curva típica do gradiente vertical de temperatura dos casos com as janelas abertas.



Todavia, a comparação dos resultados de temperatura da cota de 1,80 m do o caso de referência 'DIVplus_open' com os demais casos simulados com as janelas abertas revelou a inocuidade da compartimentação seletiva proposta. (Figura 4. 19). Curiosamente, o rompimento da bandeirola de vidro sobre a porta, que apresenta área de 0,36 m², conseguia proporcionar uma redução da temperatura mais significativa que uma abertura de 3,00 m² existente no caso '100-100plus', por exemplo.

Além da comparação dos resultados da altura da camada livre de fumaça e dos gradiente vertical de temperatura, outro indício da incompatibilidade entre o modelo e o domínio foi observado. Quatro simulações de casos com as janelas fechadas ['50-50plus', '50-75plus', '50-100plus' e '100-50plus'] foram interrompidos por instabilidade numérica nos instantes finais da simulação, ou seja, quando a sala já se encontra completamente saturada por fumaça. Por sua vez, os casos '100-75plus' e '100-100plus', que apresentam maior área para exaustão da fumaça e com isso uma possível admissão de ar externo, não apresentaram esse tipo de erro.

Figura 4. 19 – Sobreposição das curvas representativas do gradiente vertical de temperatura dos casos com as janelas abertas²⁵ na cota de 1,80 m: a mudança de direção em cada curva indica o instante de ruptura da bandeirola sobre a porta.



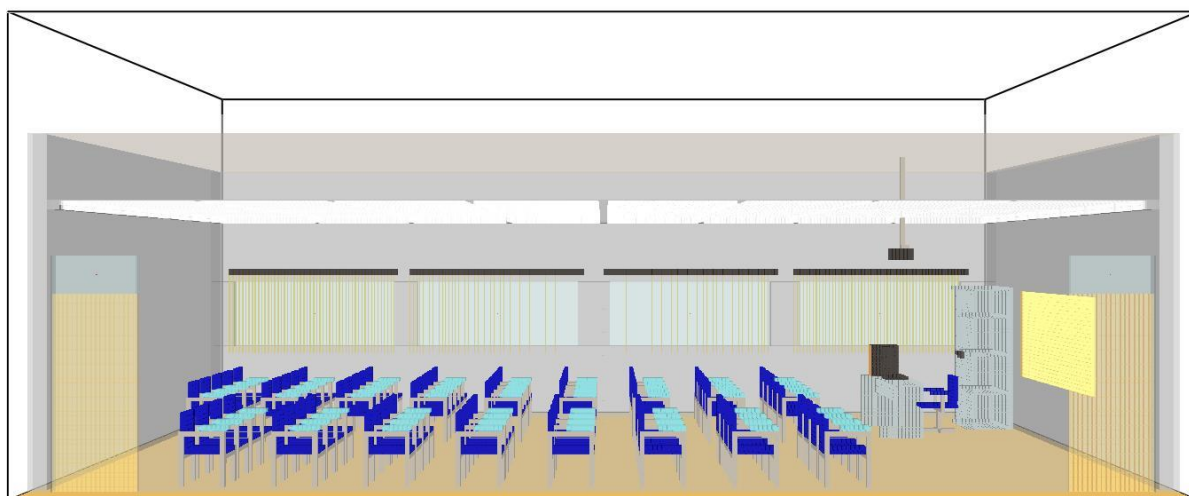
A análise de todos esses indicativos reforçou a hipótese de que algo impedia a exaustão zenital da fumaça, pois os resultados dos casos providos de compartimentação seletiva, seja com as janelas fechadas ou abertas, eram sempre os mesmos dos casos de referência, ou seja, os casos 'DIVplus' e 'DIVplus_open', respectivamente.

Objetivando validar a hipótese levantada, decidiu-se por expandir o domínio em 1,00 m no eixo Z, visando criar um espaço livre sobre o modelo para a dispersão da fumaça antes dela atingir a face superior do domínio (Figura 4. 20). Consequentemente, essa medida implicou no acréscimo de células, uma vez que a definição de malha foi mantida.

²⁵ A sobreposição das curvas de todos os casos simulados com as janelas abertas tornaria o gráfico demasiadamente carregado de informações, o que certamente atrapalharia a leitura visual dos resultados. Logo, optou-se por sobrepor apenas as curvas dos casos de referência e daqueles com abertura na divisória de 1,00 m.

Figura 4. 20 – Vista do caso-base aperfeiçoado [CBplus], com domínio expandido no eixo Z.

Smokeyview 6.1.12 – Oct 1 2014



mesh: 1

Na Tabela 4. 3 resume-se a configurações adotadas nas simulações. As propriedades térmicas empregadas nos materiais e nas superfícies que compõem o modelo estão descritas nos Apêndices B e C, respectivamente. O Apêndice D apresenta a transcrição integral do arquivo de entrada de dados do caso-base.

Tabela 4. 3 – Configuração definitiva das simulações

DOMÍNIO [X; Y; Z] (m)	MALHA	TOTAL DE CÉLULAS	HRR	COMPOSTO QUEIMANTE	SOOT_YIELD	TEMPO (s)
12,2; 8,4; 5,0	122; 84; 50	512.400	Retirado da norma BS 3974/2001	Poliuretano padrão do FDS	5%	300

4.2 Resultados obtidos

Os resultados apresentados a seguir consistem na compilação dos valores contidos nos arquivos de saída de dados, gerados pelo FDS ao término de cada simulação. É oportuno destacar que toda a dificuldade encontrada na elaboração do arquivo de entrada de dados é compensada pela diversidade dos resultados gerados. O FDS revela-se bastante transparente a respeito dos parâmetros adotados nas simulações, principalmente daqueles que não sofreram intervenção do operador. É possível identificar, dentre tantos outros valores, os coeficientes

empregados no modelo de turbulência e as transformações químicas decorrentes do processo de combustão dos materiais presentes (Figura 4. 21).

Figura 4. 21 – Recortes do arquivo de saída de dados do caso ‘DIVplus’, descrevendo: (a) as constantes pertinentes à mecânica dos fluidos e (b) as propriedades físicas dos materiais

(a)

(b)

Simulation Start Time (s)	0.0
Simulation End Time (s)	300.0
LES Calculation	
Deardorff Model (C_DEARDORFF)	0.10
Turbulent Prandtl Number	0.50
Turbulent Schmidt Number	0.50
Ambient Temperature (C)	25.00

AIR		
Background Species		
Molecular Weight (g/mol)	28.72994	
Ambient Density (kg/m³)	1.174	
Initial Mass Fraction	1.000	
Enthalpy of Formation (J/kg)	-1.02E+05	
Sub Species		
	Mass Fraction	Mole Fraction
NITROGEN	7.614884E-01	7.809662E-01
OXYGEN	2.307000E-01	2.071327E-01
CARBON DIOXIDE	5.907036E-04	3.856186E-04
WATER VAPOR	7.220804E-03	1.151541E-02
Viscosity (kg/m/s)		
Ambient (293 K):	1.81E-05	
500 K:	2.60E-05	
1000 K:	4.11E-05	
1500 K:	5.36E-05	
Therm. Cond. (W/m/K)		
Ambient (293 K):	3.67E-02	
500 K:	5.27E-02	
1000 K:	8.34E-02	
1500 K:	1.09E-01	

	AIR	POLYURET	PRODUCTS
POLYURETHANE	0.000000	1.000000	0.000000
NITROGEN	0.761488	0.000000	0.678509
OXYGEN	0.230700	0.000000	0.000000
CARBON DIOXIDE	0.000591	0.000000	0.247162
CARBON MONOXIDE	0.000000	0.000000	0.000000
WATER VAPOR	0.007221	0.000000	0.067986
SOOT	0.000000	0.000000	0.006343

O *software* é também bastante generoso na quantidade de dados disponibilizados para cada tipo de resultado. Nas simulações realizadas observou-se que para cada um dos sensores virtuais alocados no modelo, por meio do parâmetro “&DEVC”, foram gerados de três a quatro resultados para cada segundo de simulação [*timestep* de aproximadamente 0,32 segundo]. Os resultados são disponibilizados na forma de arquivos de texto tabulados, facilmente manipuláveis por meio de programas de edição de planilha eletrônica.

Contudo, é preciso lembrar que o tipo de resultado pretendido precisa ser descrito previamente. Por exemplo, caso se deseje conhecer a temperatura das superfícies durante a simulação é necessário incluir a linha de comando ‘&BNDF QUANTITY=WALL TEMPERATURE’ no arquivo de entrada de dados. A ausência do comando acarreta na inexistência de dados a respeito do parâmetro de interesse ao final da simulação e sua obtenção implica no reproprocessamento do arquivo de entrada de dados corrigido.

4.2.1 Tempo de processamento

O elevado tempo de processamento observado nas simulações desenvolvidas durante a pesquisa instigou a busca por soluções voltadas para

reduzir o consumo computacional, mas que não envolvessem a definição da malha. O manual do usuário (McGRATTAN, et. al., 2014, p. 9) sugere que quando a temperatura do ambiente não se aproxima do *flashover*, torna-se adequado alterar a configuração padrão do parâmetro que trata do calor específico, por meio do comando: 'CONSTANT_SPECIFIC_HEAT_RATIO=.TRUE.' juntamente com o parâmetro 'STRATIFICATION=.FALSE.'. Procedendo dessa maneira, assume-se que todas as substâncias gasosas são diatômicas, ou seja, que o calor específico dos gases participantes da combustão depende exclusivamente de sua massa molecular. Esse tipo de tratamento dado aos gases era o único possível até a versão 5 do FDS e a possibilidade de tratar as propriedades físicas das substâncias gasosas de modo dependente da temperatura foi uma inovação trazida pela versão 6 do *software*. Ao alterar os supracitados parâmetros, ou seja, ao fazer a versão 6 do programa tratar os gases conforme eles eram tratados até a versão 5 reduz-se, segundo o manual do usuário, o tempo de processamento em função da desativação da etapa de cálculo necessária para a redução das incertezas das substâncias gasosas.

Outro artifício sugerido pelo manual do usuário para poupar tempo de processamento é a desativação do cálculo de transferência de calor por radiação, por meio do comando 'RADIATION=.FALSE.'. Dessa maneira, o FDS assume um valor constante para a fração de energia dissipada por radiação. Segundo o manual, esse procedimento pode ser aplicado em simulações que fazem uso de chamas pequenas em ambientes relativamente grandes e quando não há o interesse em investigar a transferência de calor para as estruturas circundantes.

Ciente da limitação dos recursos computacionais disponíveis e considerando que o modelo adotado nas simulações enquadrava-se nas condições impostas, optou-se por seguir as recomendações contidas no manual do usuário, voltadas para a redução do tempo de processamento nas simulações definitivas. Na Tabela 4. 4 apresenta-se resumidamente o tempo de processamento de cada caso.

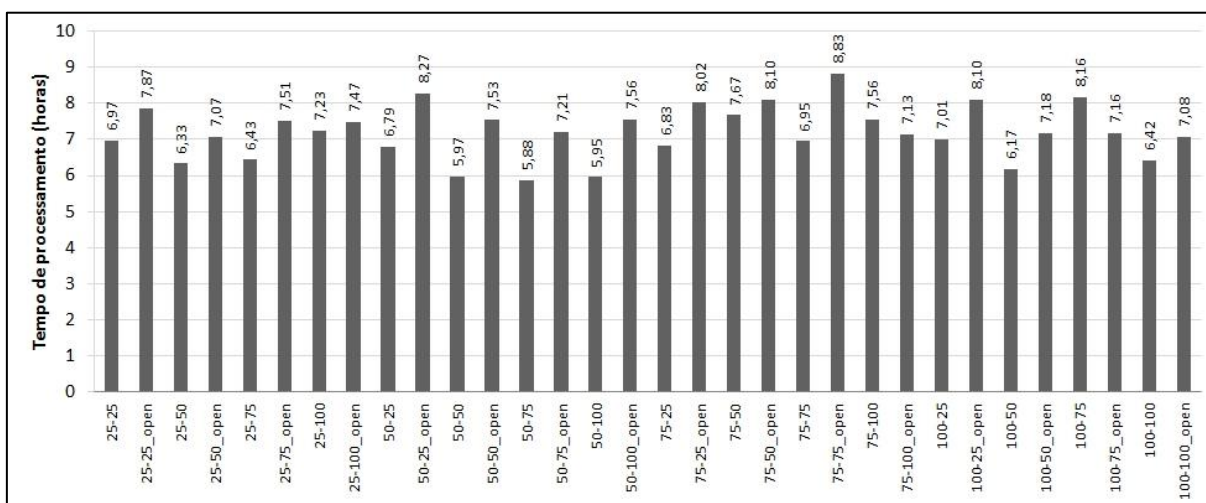
Tabela 4. 4 – Tempo de processamento das simulações definitivas

Nº	CASO	TEMPO DE SIMULAÇÃO (horas)	TEMPO DE SIMULAÇÃO (dd, hh:mm)	TOTAL DE INTERAÇÕES	OBSERVAÇÃO
1	CBplus	161,26	6 dias, 17 h 15 min	210.157	
2	CBplus_open	10,79	10 h 47 min	26.718	Bandeirola 02 rompeu aos 148 seg.; Bandeirola 01 rompeu aos 189 segundos.
3	DIVplus	327,06	13 dias, 15 h 03 min	811.053	
4	DIVplus_open	8,10	8 h 06 min	25.186	Bandeirola rompeu aos 260 segundos.
5	25-25	6,97	6 h 58 min	23.552	Bandeirola rompeu aos 260 segundos.
6	25-25_open	7,87	7 h 52 min	26.588	
7	25-50	6,33	6 h 19 min	23.589	Bandeirola rompeu aos 257 segundos.
8	25-50_open	7,07	7 h 04 min	26.099	
9	25-75	6,43	6 h 25 min	23.525	Bandeirola rompeu aos 265 segundos.
10	25-75_open	7,51	7 h 30 min	25.885	
11	25-100	7,23	7 h 13 min	23.748	Bandeirola rompeu aos 259 segundos.
12	25-100_open	7,47	7 h 28 min	26.018	
13	50-25	6,79	6 h 47 min	23.704	Bandeirola rompeu aos 252 segundos.
14	50-25_open	8,27	8 h 16 min	26.478	
15	50-50	5,97	5 h 58 min	23.833	
16	50-50_open	7,53	7 h 31 min	25.300	
17	50-75	5,88	5 h 52 min	23.964	Bandeirola rompeu aos 262 segundos.
18	50-75_open	7,21	7 h 12 min	24.933	
19	50-100	5,95	5 h 57 min	23.946	Bandeirola rompeu aos 274 segundos.
20	50-100_open	7,56	7 h 33 min	24.838	
21	75-25	6,83	6 h 49 min	23.746	Bandeirola rompeu aos 253 segundos.
22	75-25_open	8,02	8 h 01 min	26.407	
23	75-50	7,67	7 h 40 min	23.994	Bandeirola rompeu aos 268 segundos.
24	75-50_open	8,10	8 h 06 min	24.813	
25	75-75	6,95	6 h 57 min	24.158	Bandeirola rompeu aos 273 segundos.

Nº	CASO	TEMPO DE SIMULAÇÃO (horas)	TEMPO DE SIMULAÇÃO (dd, hh:mm)	TOTAL DE INTERAÇÕES	OBSERVAÇÃO
26	75-75_open	8,83	8 h 49 min	23.257	
27	75-100	7,56	7 h 33 min	24.496	Bandeirola rompeu aos 274 segundos.
28	75-100_open	7,13	7 h 07 min	23.352	
29	100-25	7,01	7 h 00 min	23.699	Bandeirola rompeu aos 255 segundos.
30	100-25_open	8,10	8 h 06 min	26.363	
31	100-50	6,17	6 h 10 min	24.096	Bandeirola rompeu aos 274 segundos.
32	100-50_open	7,18	7 h 10 min	24.551	
33	100-75	8,16	8 h 09 min	24.460	Bandeirola rompeu aos 263 segundos.
34	100-75_open	7,16	7 h 09 min	24.046	
35	100-100	6,42	6 h 25 min	24.605	
36	100-100_open	7,08	7 h 04 min	23.035	

Os resultados mostraram que os dois casos desprovidos de qualquer tipo de interligação com o meio externo, os casos 'CBplus' e 'DIVplus', apresentaram tempo de processamento substancialmente elevado, principalmente se forem comparados com seus respectivos antagonistas: os casos 'CBplus_open' e 'DIVplus_open'. Atentando para os casos providos de compartimentação seletiva, percebeu-se que não há uma relação bem estabelecida entre tempo de processamento e a área total de abertura disponível para exaustão (Figura 4. 22).

Figura 4. 22 – Gráfico do tempo de processamento dos casos providos de compartimentação seletiva

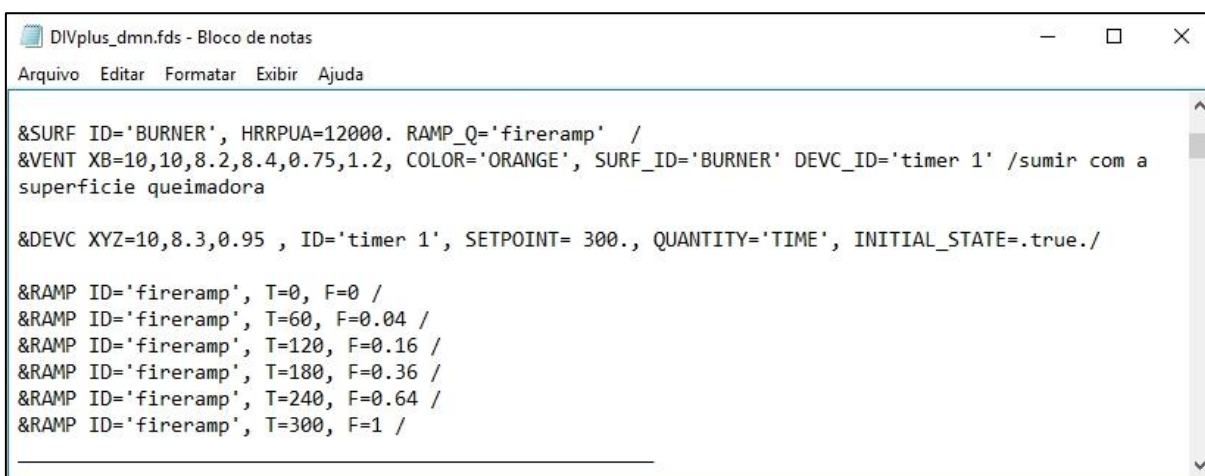


Em algumas ocasiões os casos com as janelas abertas apresentaram tempo de processamento superior em relação aos respectivos antagonistas, a exemplo dos casos '25-25plus' e '25-25plus_open', enquanto que em outros, ocorreu o contrário, a exemplo dos casos '100-75plus' e '100-75plus_open'. Contudo, os casos 'open' apresentam tempo de processamento médio mais elevado: 7 horas e 37 minutos, contra 6 horas e 46 minutos dos casos simulados com as janelas fechadas.

4.2.2 Taxa de liberação de calor

Conforme descrito no item 2.1, a norma britânica BS 3974/2001 apresenta uma equação para estimar a taxa de liberação de calor [HRR] na fase de aquecimento considerando quatro tipos de crescimento de incêndio. No presente trabalho foi adotado o parâmetro de crescimento denominado como 'médio', após uma reflexão a respeito dos valores adotados por diversos autores, discutidos no item 3.1.1. Os valores referentes ao parâmetro de crescimento médio, expressos na Tabela 2. 2, foram inseridos nos arquivos de entrada de dados por meio do comando 'RAMP_Q' (Figura 4. 23).

Figura 4. 23 – Recorte do arquivo de entrada de dados do caso 'DIVplus', com o trecho que descreve a aplicação do comando 'RAMP_Q= "firemap"' atribuindo à chama os valores do crescimento médio de incêndio, contidos na Tabela 2. 2.



```

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=12000. RAMP_Q='fireramp' /
&VENT XB=10,10,8.2,8.4,0.75,1.2, COLOR='ORANGE', SURF_ID='BURNER' DEVC_ID='timer 1' /sumir com a
superficie queimadora

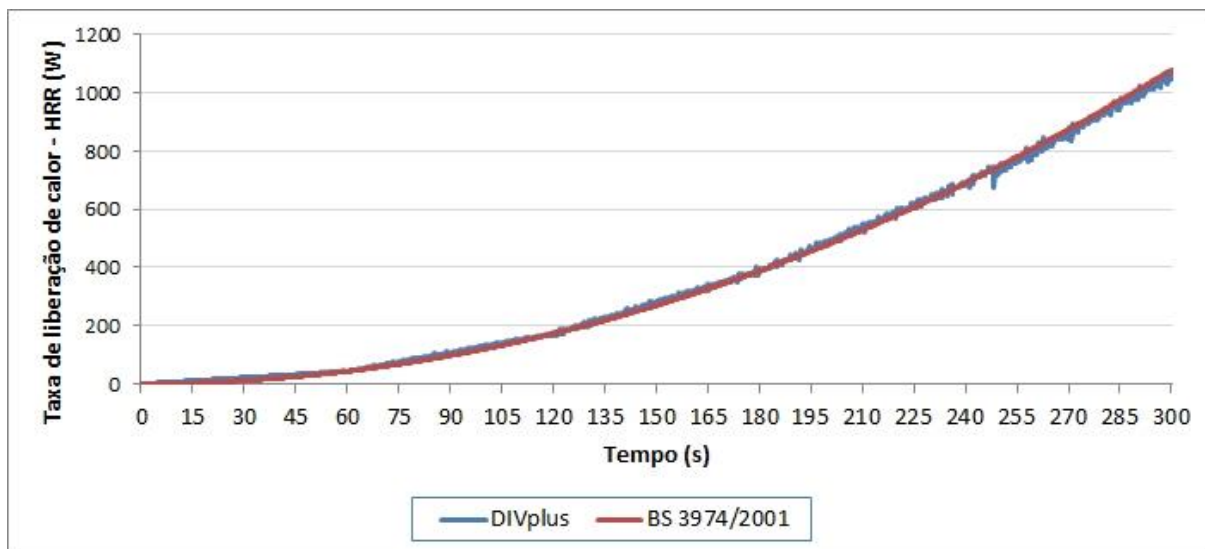
&DEVC XYZ=10,8.3,0.95 , ID='timer 1', SETPOINT= 300., QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.true./

&RAMP ID='fireramp', T=0, F=0 /
&RAMP ID='fireramp', T=60, F=0.04 /
&RAMP ID='fireramp', T=120, F=0.16 /
&RAMP ID='fireramp', T=180, F=0.36 /
&RAMP ID='fireramp', T=240, F=0.64 /
&RAMP ID='fireramp', T=300, F=1 /
  
```

Dentre os diversos arquivos de saída de dados gerados durante a simulação, o FDS disponibiliza um com os valores instantâneos de HRR, por meio do qual é possível verificar se os valores obtidos na equação de referência foram seguidos adequadamente. A compilação gráfica dos dados tabulados gerados pelo FDS revela a existência de dois padrões típicos, descritos a seguir:

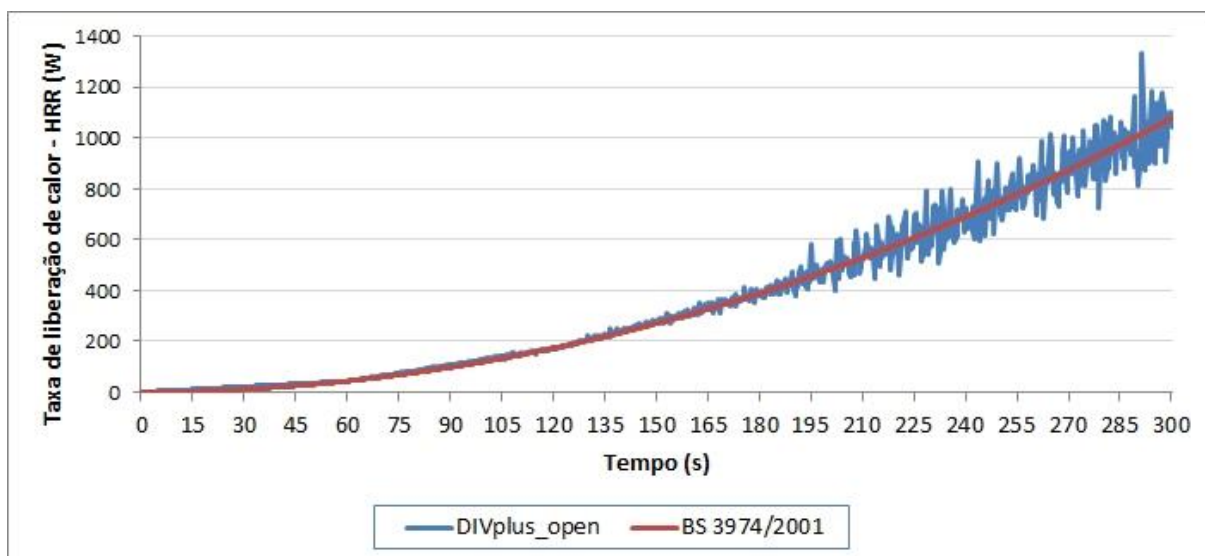
- a) Os casos desprovidos de aberturas para o meio externo ['CBplus' e 'DIVplus'] apresentaram pouca oscilação da taxa de liberação de calor em relação à curva de referência (Figura 4. 24);

Figura 4. 24 – Curva típica do comportamento da taxa de liberação de calor dos casos com as janelas fechadas.



- b) Os casos simulados com as janelas abertas ou providos de compartimentação seletiva, ou seja, que possuem algum tipo de comunicação com o meio externo, apresentaram uma oscilação bem mais acentuada entorno dos valores esperados (Figura 4. 25).

Figura 4. 25 – Curva típica do comportamento da taxa de liberação de calor dos casos com aberturas de intercomunicação com o meio externo.

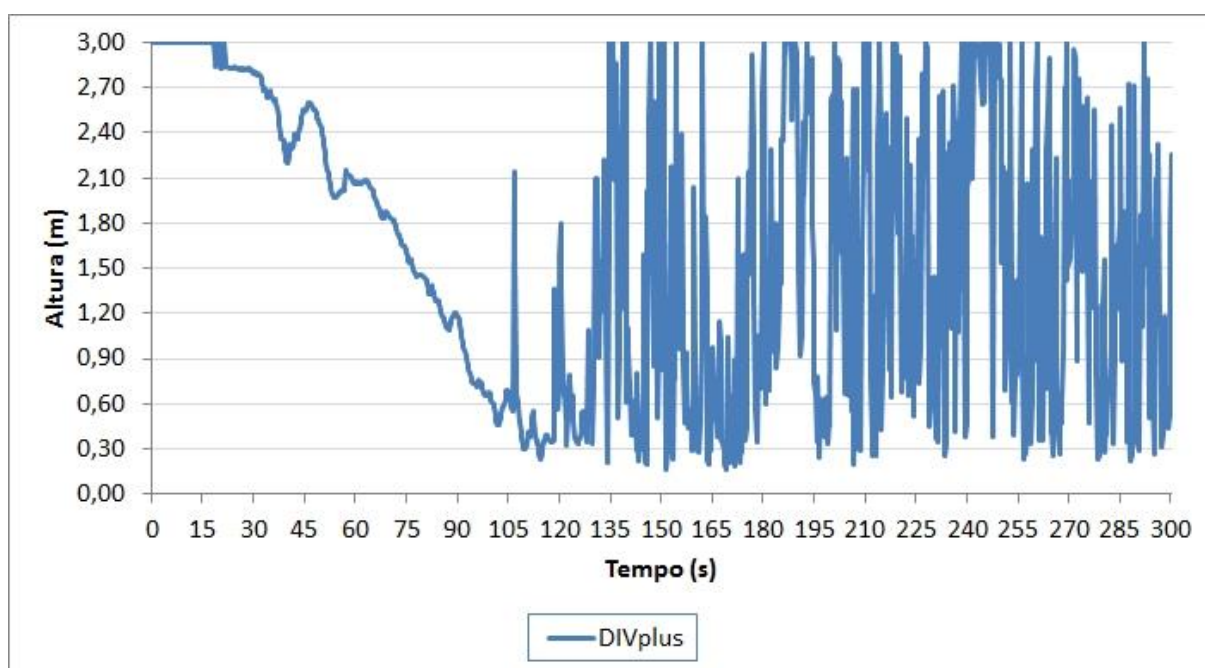


4.2.3 Altura da camada livre de fumaça

A leitura dos dados referentes à altura da camada visível foi obtida por meio do comando '&DEVC (...) QUANTITY='LAYER HEIGHT''. A inclusão desse comando faz com que o FDS registre os valores da altura da camada ar não contaminada por fumaça em uma determinada posição do domínio, a cada instante da simulação. Considerando as dimensões do modelo, optou-se por realizar a medição da altura da camada visível a partir de uma linha vertical posicionada no centro geométrico da sala.

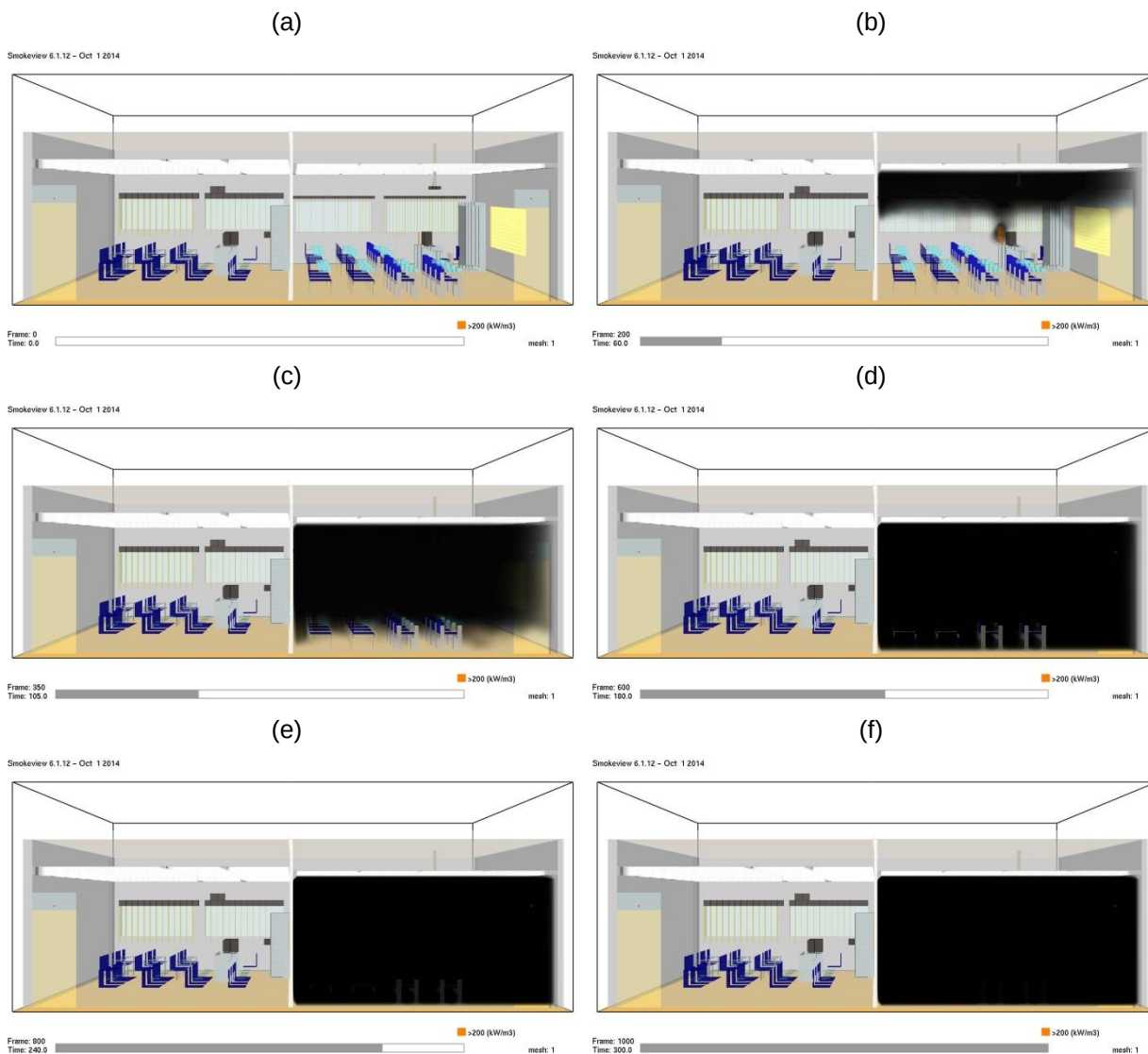
A conversão gráfica dos dados tabulados gerados pelo *software* revelou novamente dois comportamentos típicos associados à presença de aberturas. Nos casos selados 'CBplus' e 'DIVplus' ocorreu uma rápida redução da altura da camada livre de fumaça nos primeiros minutos, seguida de uma intensa oscilação dos valores, que perdurava até final da simulação (Figura 4. 26).

Figura 4. 26 – Curva típica da altura da camada livre de fumaça dos casos desprovidos de abertura.



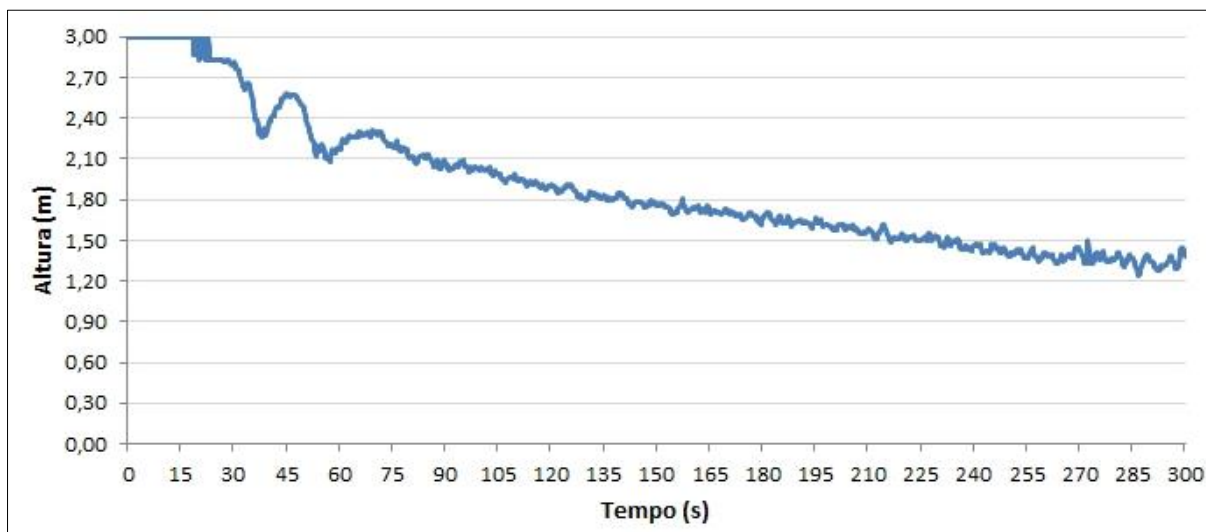
Todavia, esse comportamento oscilatório da camada de fumaça denunciado pelo gráfico não é corroborado pela visualização proporcionada pelo *Smokeview*, onde se percebe que não há variação da altura da camada visível após o preenchimento da sala por fumaça (Figura 4. 27).

Figura 4. 27 – Visualização do crescimento da camada de fumaça do caso 'DIVplus', nos instantes (a) 0 s.; (b) 60 s.; (c) 105 s.; (d) 180 s.; (e) 240 s. e (f) 300 s.



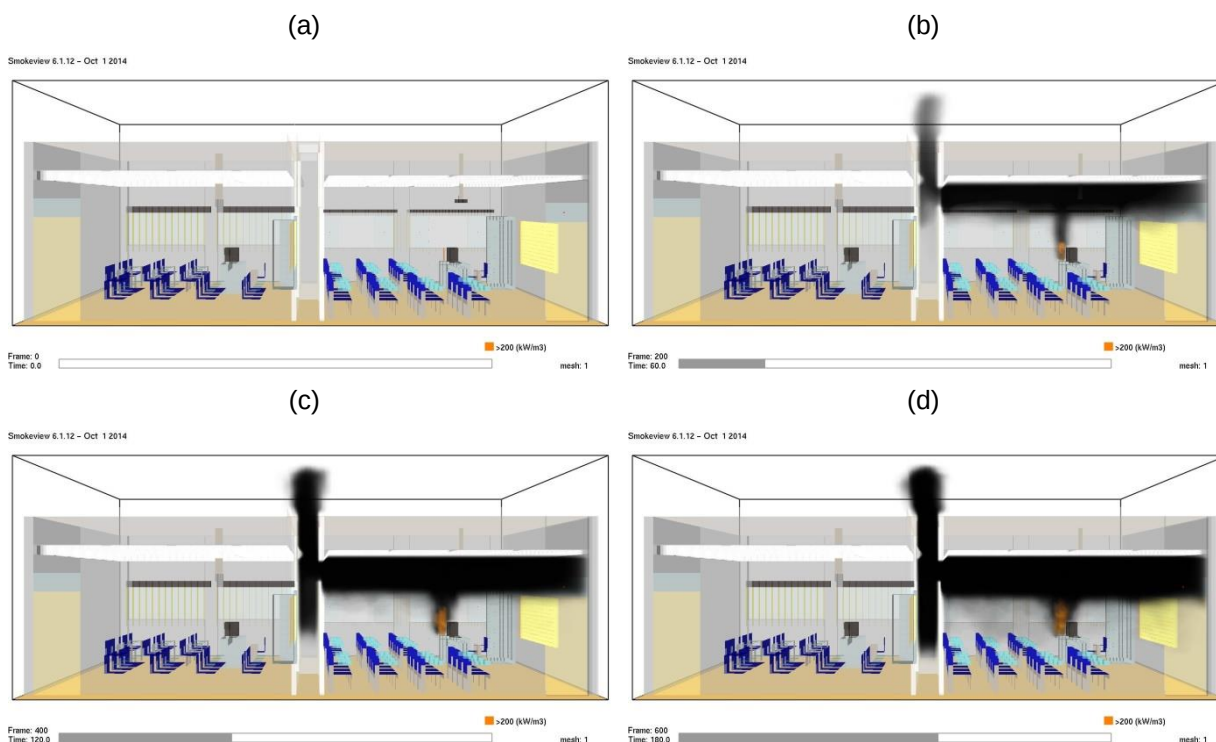
Os demais casos apresentavam curvas com oscilação significativamente menor e com tendência a estabilizarem-se nos instantes finais da simulação (Figura 4. 28).

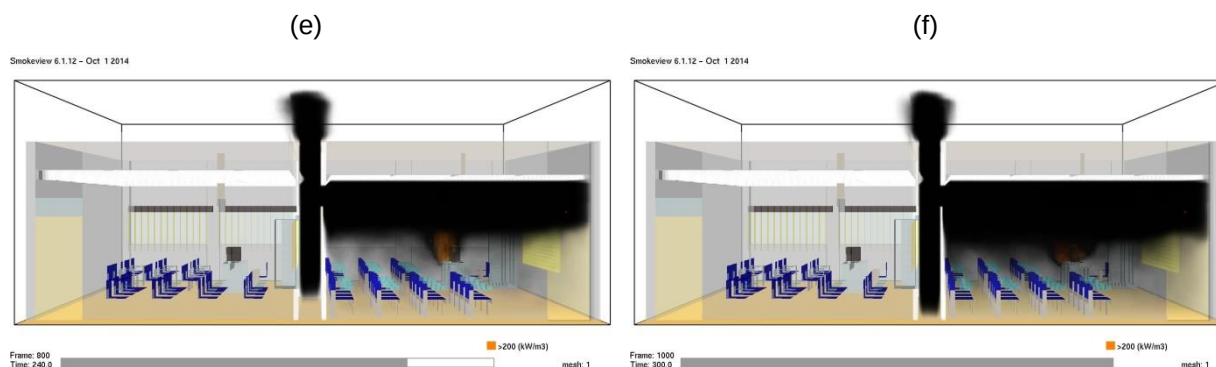
Figura 4. 28 – Curva típica da altura da camada livre de fumaça dos casos com aberturas.



Ao contrário do que ocorreu com os casos selados, o comportamento dos casos providos de algum tipo de abertura é bastante coerente com a visualização proporcionada pelo *Smokeview*, ou seja, um decaimento paulatino que tende a se estabilizar em torno da cota de 1,10 m, mesma altura do peitoril da janela (Figura 4. 29).

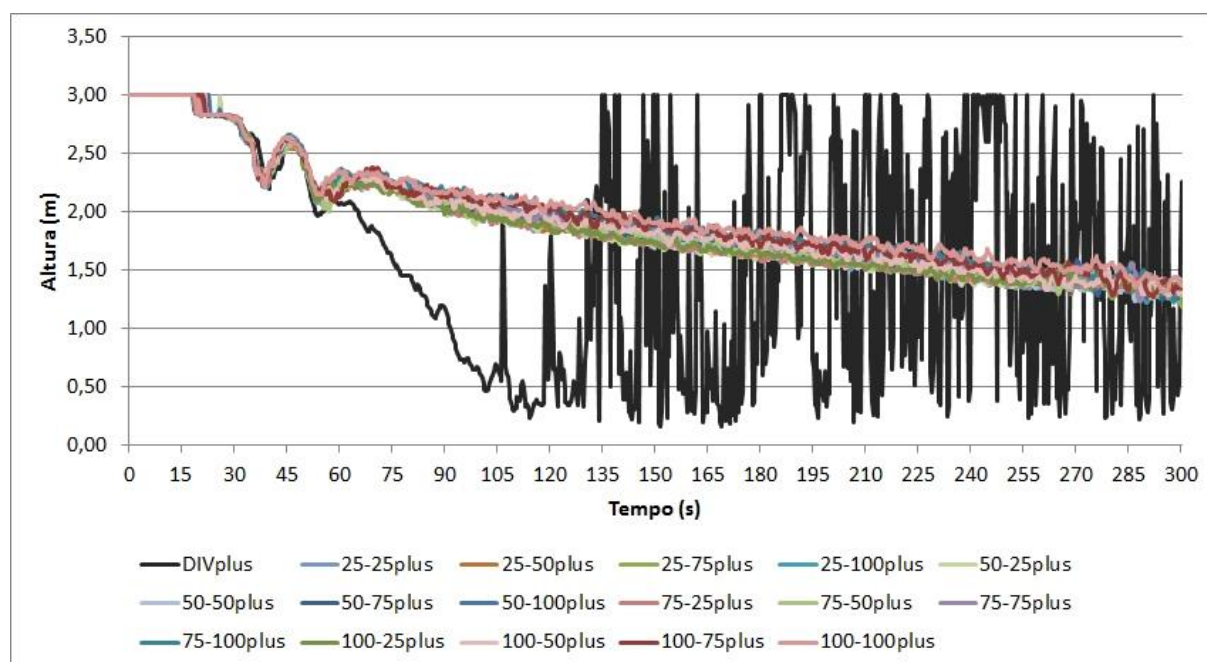
Figura 4. 29 – Visualização do crescimento da camada de fumaça do caso '50-50plus_open', nos instantes (a) 0 s.; (b) 60 s.; (c) 120 s.; (d) 180 s; (e) 240 s. e (f) 300 s.





Analisando apenas os resultados dos casos simulados com as janelas fechadas, percebe-se que a compartimentação seletiva foi capaz de promover benefícios para os ocupantes durante a evacuação, pois tornou a redução da camada livre de fumaça menos intensa, além de estabilizá-la acima de 1,00 m de altura. Percebeu-se, contudo, pouca diferença entre os resultados obtidos com diferentes combinações de aberturas na divisória e na laje, indicando a inexistência de um coeficiente de proporcionalidade entre os vãos disponíveis para a exaustão e o acréscimo na altura da camada livre de fumaça (Figura 4. 30).

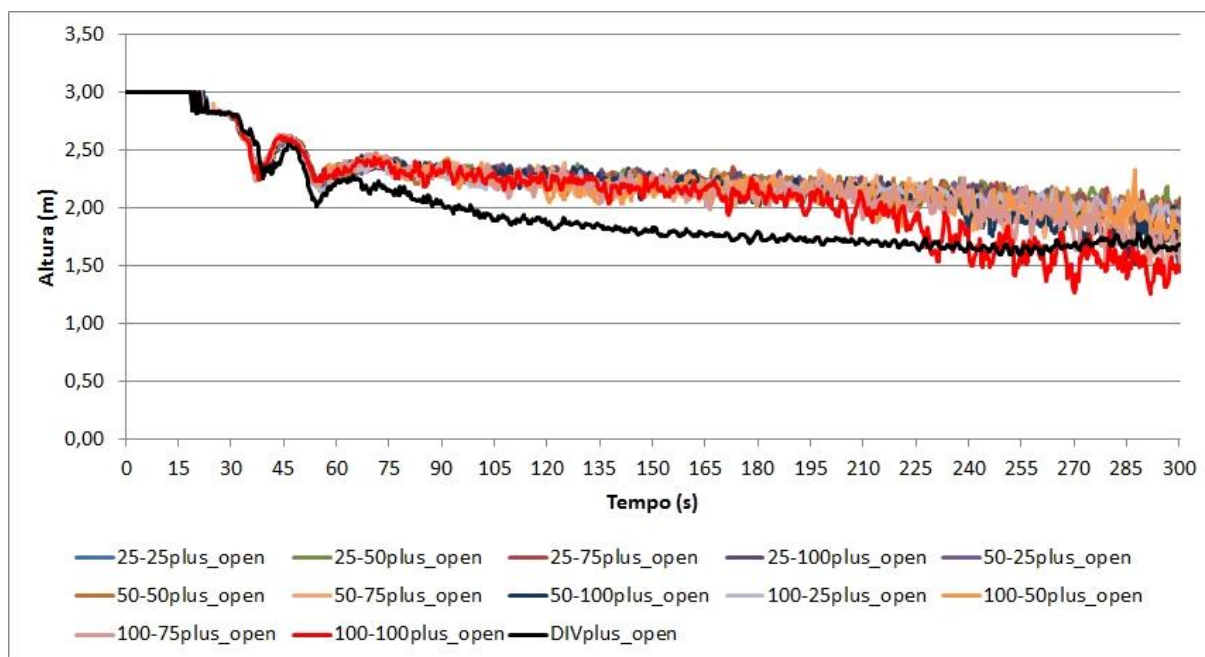
Figura 4. 30 – Sobreposição das curvas representativas da altura da camada livre de fumaça dos casos com as janelas fechadas.



Atentando para os casos simulados com as janelas abertas, percebeu-se um discreto incremento na altura da camada visível nos casos providos de compartimentação seletiva em relação ao caso de referência 'DIVplus_open' (Figura 4. 31). Contudo, considerando a margem de erro envolvida e a sobreposição das

curvas representativas de cada caso, pode-se afirmar que, além de insensível às diferentes combinações de abertura na divisória e na laje, a exaustão promovida pelas janelas torna desnecessária a utilização da compartimentação horizontal seletiva.

Figura 4. 31 – Sobreposição das curvas representativas da altura da camada livre de fumaça dos casos com as janelas abertas.



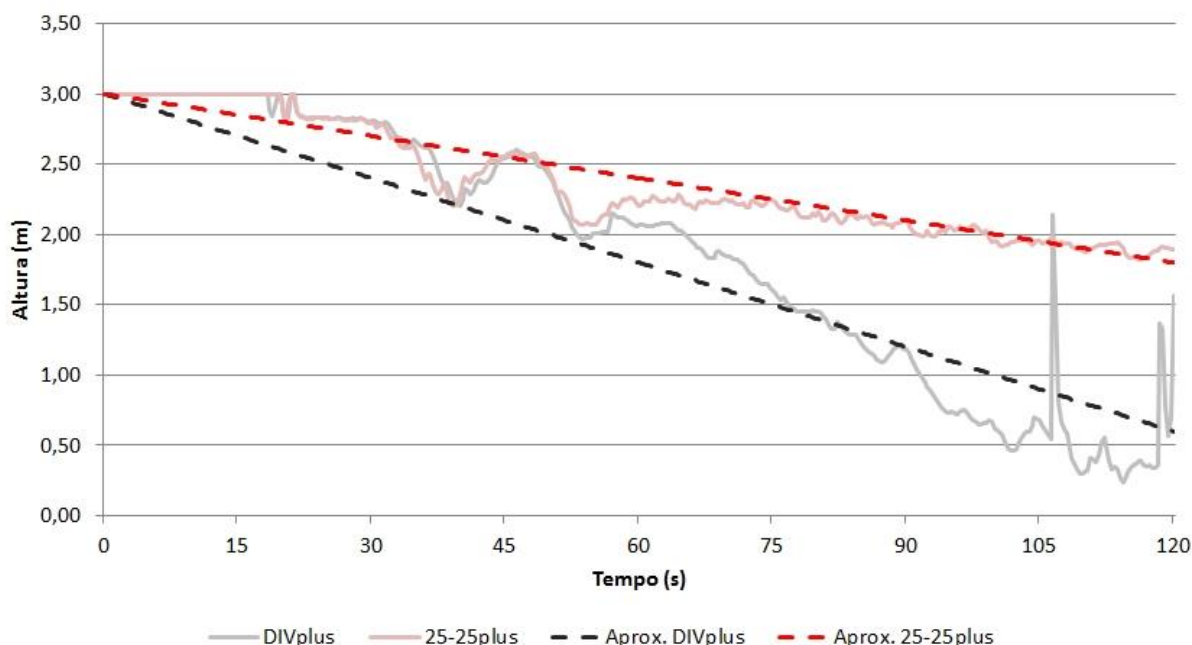
Diante desses resultados e objetivando quantificar o benefício promovido pela compartimentação horizontal seletiva, buscou-se deduzir as expressões matemáticas que representam a redução da camada visível em função do tempo. O desenvolvimento de tais expressões foi embasado nas considerações descritas a seguir:

- a) A compartimentação horizontal seletiva apresentou benefícios mais expressivos nos casos simulados com as janelas fechadas;
- b) As diferentes configurações de abertura na divisória e na laje não implicaram em diferenças expressivas no retardo do crescimento da camada de fumaça;
- c) Os resultados do caso 'DIVplus' apresentaram-se coerentes à visualização proporcionada pelo *Smokeview* apenas nos dois primeiros minutos de simulação.

Desse modo, selecionaram-se os resultados referentes aos dois primeiros minutos de simulação dos casos 'DIVplus' e '25-25plus'. Na Figura 4. 32 mostra-se

graficamente a aproximação matemática dos dois casos selecionados no intervalo de tempo de interesse.

Figura 4. 32 – Gráfico da camada visível dos casos 'DIVplus' e '25-25plus' nos instantes iniciais da simulação, com as respectivas aproximações matemáticas.



As equações 4. 1 e 4. 2 expressam a redução da camada visível de cada caso.

$$H_{cv} = H_0 - 0,02t \quad (\text{Equação 4. 1})$$

Sendo:

H_{cv} : Altura da camada visível do caso de referência 'DIVplus', em metros;

H_0 : Altura do ambiente [pé-direito], de piso a forro, em metros;

t : Tempo, em segundos.

$$H_{cs} = H_0 - 0,01t \quad (\text{Equação 4. 2})$$

Sendo:

H_{cs} : Altura da camada visível representativa dos casos providos de compartimentação seletiva, em metros;

H_0 : Altura do ambiente [pé-direito], de piso a forro, em metros;

t : Tempo, em segundos.

Percebeu-se, portanto, que a compartimentação horizontal seletiva reduziu à metade a velocidade de crescimento da camada de fumaça. Ou seja, enquanto que no caso de referência a camada visível reduzia-se aproximadamente dois

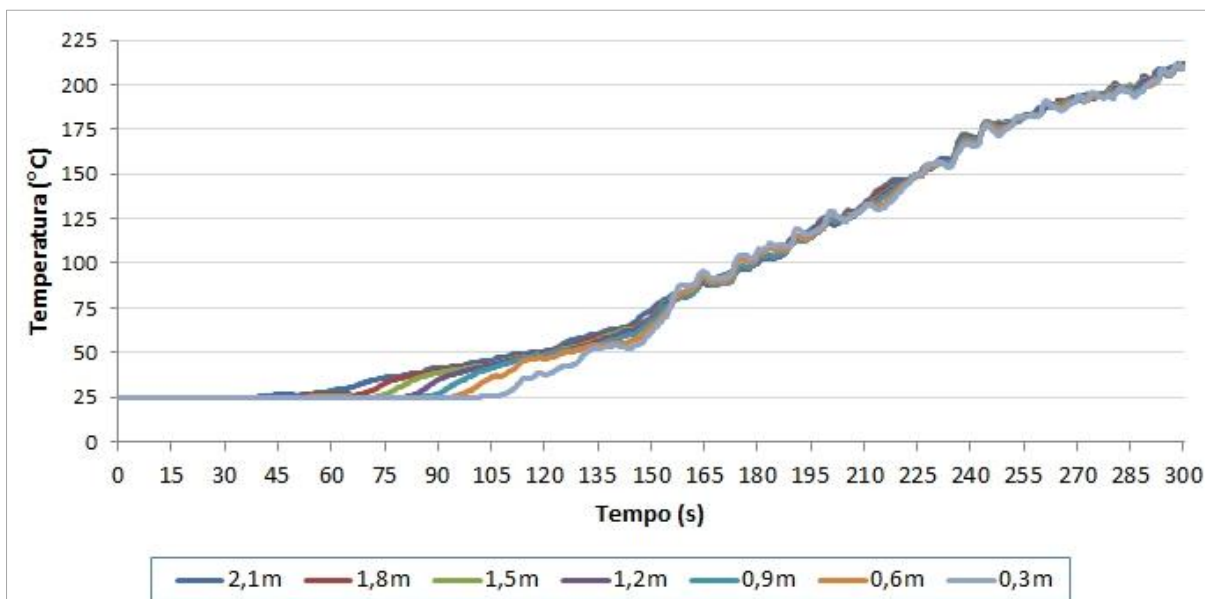
centímetros por segundo, com a compartimentação horizontal seletiva essa redução foi por volta de um centímetro por segundo. Por fim, nenhum caso apresentou a altura mínima de 2,50 m da camada visível determinada pela IT 15-5/ 2011 ao término do período simulado. De modo geral, esse valor foi atingido no intervalo inferior a um minuto de simulação.

4.2.4 Gradiente vertical de temperatura

O estudo do gradiente vertical de temperatura permite verificar a evolução do crescimento da temperatura em cotas distintas. No presente estudo, adotaram-se sete pontos de medição, dispostos verticalmente no centro geométrico da sala, com espaçamento de 0,30 m entre si. Esses pontos de medição foram dispostos por meio do comando '&DEVC (...), QUANTITY='THERMOCOUPLE''.

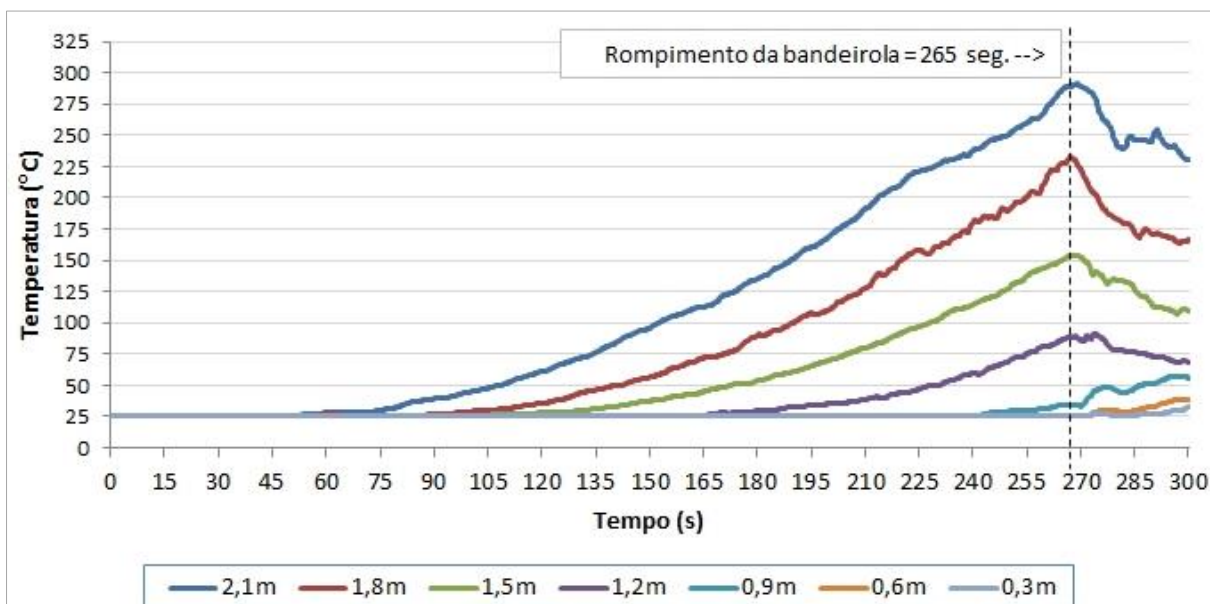
Assim como observado durante a análise dos dados referentes à altura da camada livre de fumaça, os resultados do gradiente vertical de temperatura revelaram dois comportamentos típicos e associados à presença de aberturas no modelo. Os casos selados apresentaram elevação praticamente homogênea da temperatura em todos os sete pontos de medição, descaracterizando a formação de camadas termicamente distintas (Figura 4. 33). Os resultados do caso 'DIVplus', que representa a forma trivial de particionamento, mostraram que a temperatura limite de sobrevivência humana foi atingida aos dois minutos de simulação e a temperatura máxima foi superior a 200 °C.

Figura 4. 33 – Curva típica do gradiente vertical de temperatura dos casos desprovidos de abertura.



Os casos simulados com as janelas abertas ou providos de compartimentação seletiva apresentaram elevação de temperatura diferenciada em cada cota, perfazendo um gradiente vertical de temperatura significativo (Figura 4. 34).

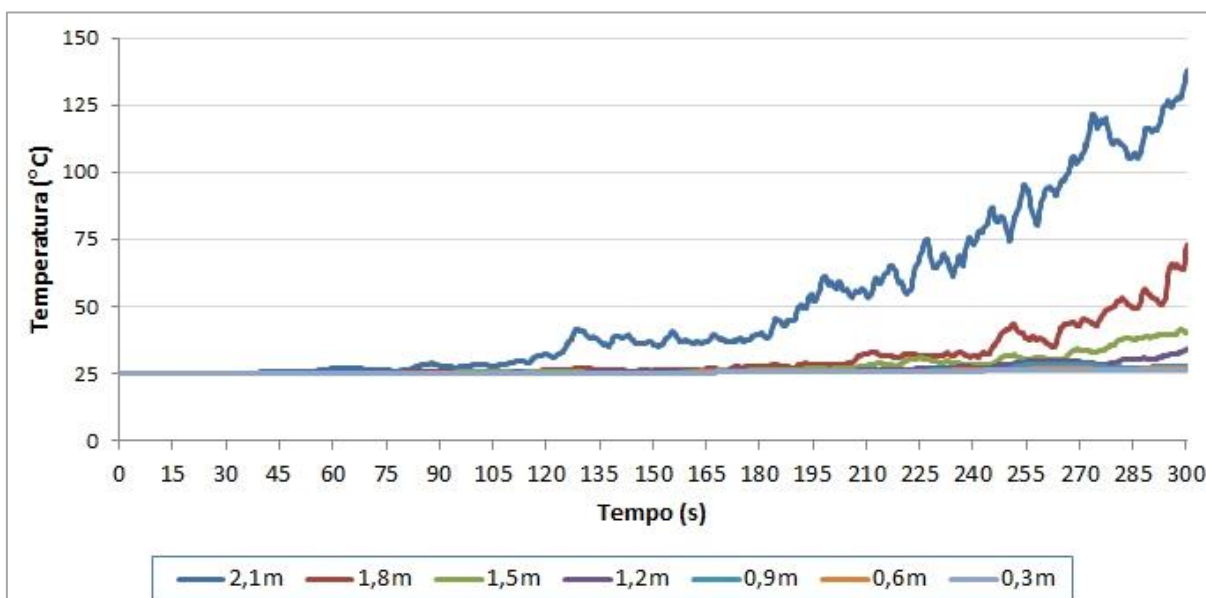
Figura 4. 34 – Curvas típicas do gradiente vertical de temperatura dos casos com abertura.



Dentre os modelos providos de compartimentação seletiva, o gradiente vertical de temperatura se mostrou mais evidente e expressivo nos casos simulados com as janelas fechadas. Nesses casos, a elevação de temperatura ocorre de modo mais rápido, é capaz de elevar a temperatura de pontos mais próximos do chão e

atinge valores mais elevados nos pontos mais altos. Nos casos simulados com as janelas abertas, apenas os pontos mais altos apresentaram elevação de temperatura, ainda assim de modo menos intenso, e apresentaram temperatura final menos elevada (Figura 4. 35).

Figura 4. 35 – Curva típica do gradiente vertical de temperatura dos casos com as janelas abertas.



Objetivando estabelecer uma comparação dos resultados obtidos com os diferentes casos de compartimentação seletiva, optou-se por selecionar apenas os dados referentes à elevação de temperatura do ponto posicionado a 1,80 m do piso, por ser a cota pré-estabelecida imediatamente superior à estatura média do cidadão brasileiro. Atentando para os casos com as janelas abertas, observou-se benefícios relevantes proporcionados pela compartimentação seletiva, pois enquanto que no caso 'DIVplus_open' a temperatura de 50 °C foi atingida aos 137 segundos, nos demais o mesmo valor foi atingido sempre após 220 segundos de simulação (Figura 4. 36). Contudo, a confirmação desses valores deve ser revalidada por novas pesquisas

Nos casos simulados com as janelas fechadas a compartimentação seletiva também se mostrou eficaz em atenuar a elevação de temperatura, porém de modo mais sutil. O distanciamento em relação ao caso de referência 'DIVplus' ocorreu de modo mais significativo nos casos com as maiores aberturas para a exaustão da fumaça, ou seja, os casos '100-75plus' e '100-100plus' (Figura 4. 37).

Figura 4. 36 – Sobreposição das curvas representativas da elevação temporal da temperatura na cota de 1,80 m dos casos com as janelas abertas.

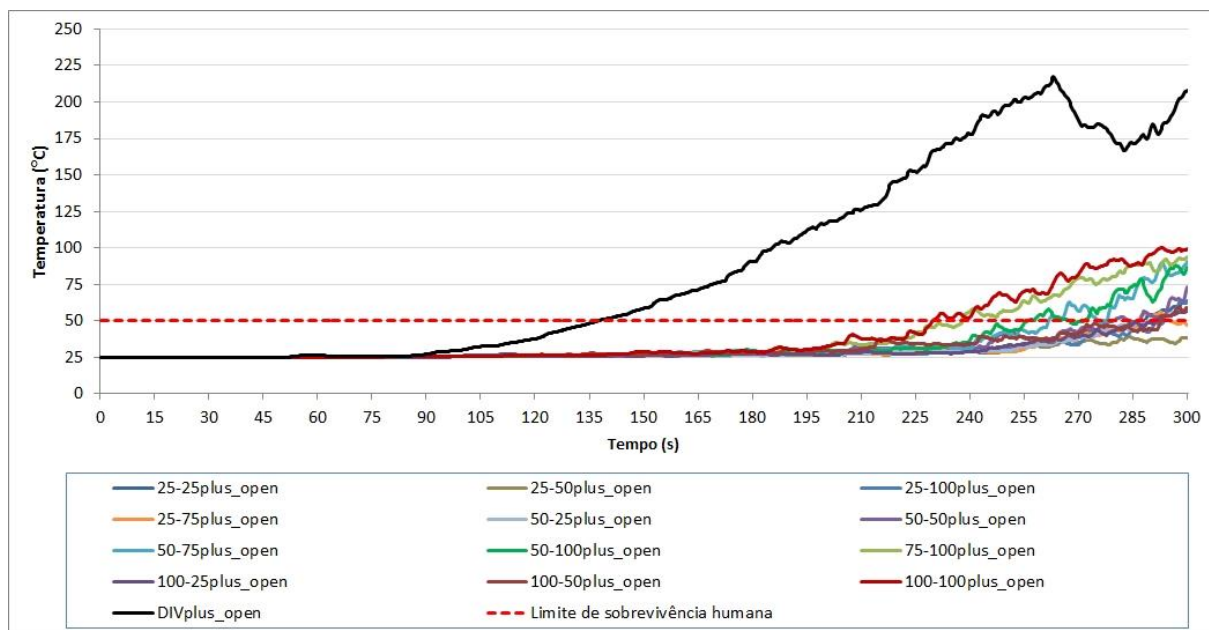
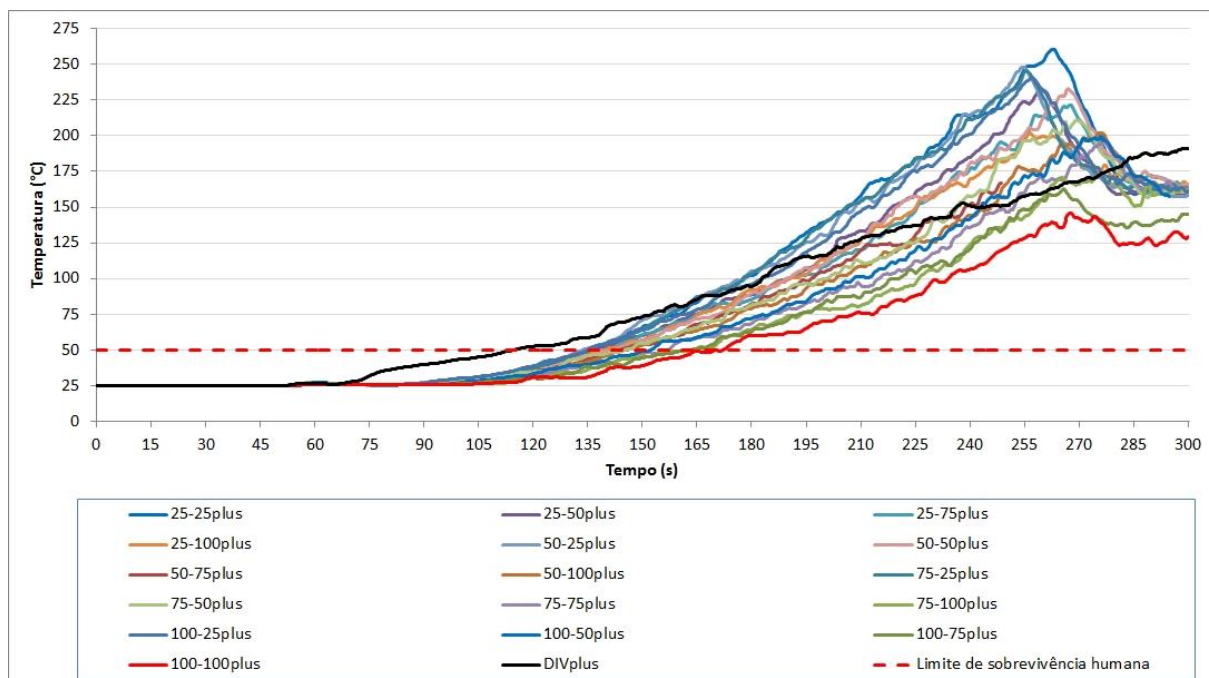


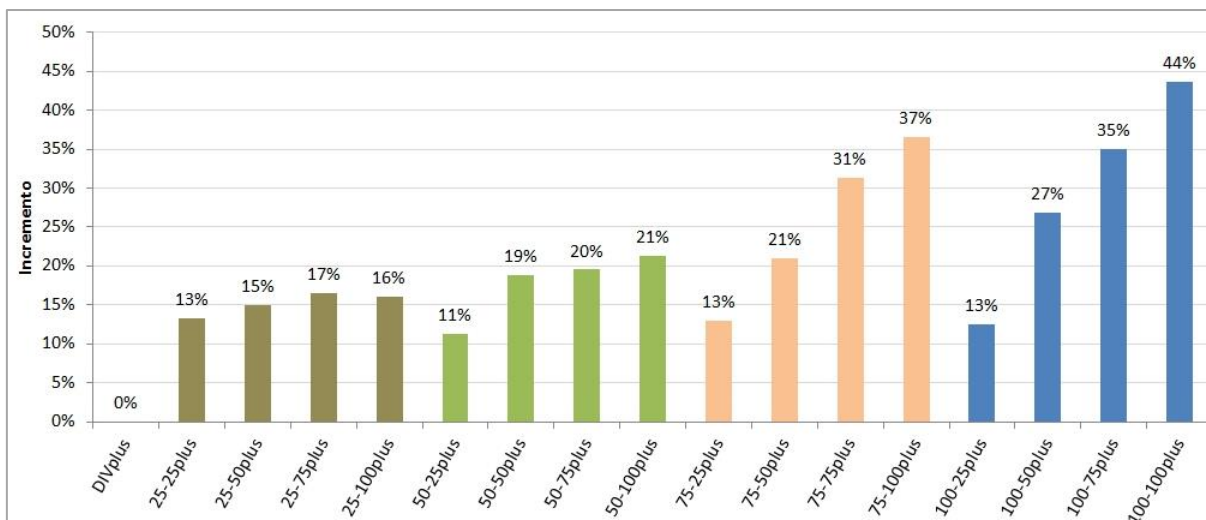
Figura 4. 37 – Sobreposição das curvas representativas da elevação temporal da temperatura na cota de 1,80m dos casos com as janelas fechadas.



Ainda sobre os casos simulados com as janelas fechadas, o melhor resultado obtido com a implantação da compartimentação seletiva, representado pelo caso '100-100plus', foi um acréscimo de pouco mais de 40% no tempo de evacuação da sala em relação ao caso de referência 'DIVplus'. Nos demais casos, o

incremento concentra-se na faixa dos 10% e dos 20%, com poucos casos acima de 30% (Figura 4. 38).

Figura 4. 38 – Incremento no tempo de escape - Janelas fechadas (Temp.<50 °C; h=1,80 m)



Observa-se, também, que o incremento no tempo de escape é condicionado pela abertura de menor dimensão, independente da localização²⁶. Desse modo, em uma eventual aplicação da compartimentação seletiva, não faria sentido empregar aberturas com diferentes dimensões na divisória e na laje, uma vez que a exaustão seria restringida por aquela de menor dimensão.

Uma das vantagens da compartimentação seletiva ora proposta é a capacidade de implementação na fase de ocupação, onde as possibilidades de atingir a compartimentação normativa são onerosas ou inexecutáveis. Todavia, é notável a natural perda de área útil, em função da largura do vão criado entre as divisórias. Logo, há de se ponderar a implantação da compartimentação seletiva quando há escassez de área diante do uso previsto.

²⁶ Conforme observado pelo Prof. Dr. George Cajaty Barbosa Braga no exame de qualificação, a exaustão promovida pela compartimentação seletiva assemelha-se a cano com uma abertura maior na entrada e outra na saída e vice-versa, onde a menor área dita, em grande parte, a capacidade de ser retirar fumaça, apenas com a diferença do volume adicional existente entre as aberturas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A respeito da validade dos resultados, é pertinente esclarecer que pesa contra qualquer simulação computacional a intrínseca relação entre os dados obtidos e as condições de contorno adotadas pelo operador. O próprio manual do usuário do FDS (McGRATTAN, et. al., 2014, p. 63) é bastante enfático sobre esse aspecto, ao afirmar que a determinação das condições de contorno é a parte mais desafiadora na criação da simulação e que é responsabilidade do operador fornecer as propriedades térmicas dos materiais para então avaliar a comportamento do modelo, certificando-se que o fenômeno de interesse está sendo simulado corretamente. A representatividade dos resultados carece, portanto, da validação por meio de ensaios experimentais.

5.1 Quanto aos resultados

Os resultados obtidos nos testes preliminares, descritos no Apêndice A, se mostraram bastante promissores. A compartimentação seletiva se mostrava capaz de retardar o crescimento da camada de fumaça de modo a quadruplicar o tempo de escape. Todavia, é válido lembrar que os testes preliminares foram simulados sob um modelo bastante simplificado e adotando-se parâmetros relativamente arbitrários para as condições de contorno. Diante de resultados tão promissores, acreditou-se que o aperfeiçoamento do modelo implicaria em resultados ainda melhores do ponto de vista da SCIE. Contudo, não foi o que ocorreu. O substancial aperfeiçoamento do modelo, que incluiu: crescimento paulatino da chama e correção da quantidade de fumaça gerada, bem como melhorias na geometria dos objetos e nos parâmetros térmicos das superfícies; implicou em resultados bem menos animadores.

Os primeiros testes com o modelo aperfeiçoado reafirmaram as expectativas citadas anteriormente. A busca pela fiel reprodução das dimensões do objeto de estudo levam, invariavelmente, a complicações tanto na modelagem quanto na definição de malha. Ou seja, a inserção de objetos delgados exige um maior refinamento de malha sob pena do *software* não reconhecer o elemento e exibir mensagem de erro ainda na etapa de leitura do arquivo de entrada, impedindo o início da simulação. Por outro lado, adotar a malha mais refinada, sugerida pelo

calculador *on-line*, desenvolvido pelo pesquisador Kristopher Overholt, implica em um tempo de processamento extraordinariamente superior e, por vezes, incompatível com computadores pessoais.

No presente estudo, a divergência entre os resultados obtidos com os modelos incipientes e os aperfeiçoados reforçou a importância do senso crítico diante de dados obtidos com o uso de simuladores de incêndio. Conforme dito anteriormente, a simulação computacional de incêndio deve ser compreendida como um instrumento complementar aos ensaios laboratoriais, dada a constante necessidade de validação dos resultados.

Os resultados mostram que a compartimentação seletiva proposta é capaz de proporcionar algum benefício nos casos simulados com as janelas fechadas ao promover maior altura da camada livre de fumaça, o que tende a tornar a evacuação mais segura. Esse mesmo critério de análise aplicado aos casos 'open' mostrou que a exaustão promovida pelas janelas abertas torna inócuos os efeitos da compartimentação seletiva. Destaca-se, também, a redução da temperatura e o maior tempo para atingir o limiar da sobrevivência na cota representativa da altura de um indivíduo adulto. Contudo, reconhece-se que as simulações realizadas apresentam limitações de ordem teórica e operacional, logo os resultados obtidos são específicos dos modelos e das condições de contorno adotadas. A extrapolação dos resultados para demais casos pode gerar conclusões equivocadas.

Quanto às limitações na aplicação da compartimentação seletiva proposta, identifica-se os seguintes pontos:

- a) Considerando a realidade local, onde uma fração significativa dos ambientes universitários é climatizada artificialmente, a atuação e eficácia da compartimentação seletiva dependem de um sistema automatizado de vedação das aberturas na divisória durante o uso cotidiano, mas que fosse capaz de liberá-las rapidamente em uma situação de incêndio;
- b) Uma solução de telhado sobre a abertura da laje capaz de proporcionar proteção contra a chuva e entrada de animais, mas que não interferisse na exaustão da fumaça;

- c) A compartimentação horizontal seletiva, conforme apresentada, induz a uma quebra da compartimentação vertical, tendo em vista a disposição de aberturas na laje para a exaustão da fumaça. Logo, o sistema proposto só se aplicaria a edificações térreas e que comportam baixa carga de incêndio. Em edificações de múltiplos pavimentos ou com elevada carga de incêndio o sistema proposto torna-se desinteressante em função da supremacia da compartimentação vertical perante a horizontal na promoção da SCIE.

De fato, diante das limitações apontadas, nota-se que a pouca expressividade dos benefícios proporcionados pela compartimentação seletiva tornam a relação custo x benefício desfavorável.

5.2 Quanto ao software utilizado

A plena utilização de *softwares* de simulação envolve, impreterivelmente, as etapas de: aprendizagem, modelagem, seleção das variáveis, testes preliminares, ajustes, tratamento dos resultados e validação. Contudo, no caso dos programas de CFD, categoria da qual o FDS faz parte, observa-se a necessidade de um considerável embasamento teórico para a adequada descrição do fenômeno físico envolvido: a combustão. “A combustão é, realmente, uma oxidação bastante complexa, envolvendo um processo de decomposição química por efeito do calor” (GOMES, 1998, p. 13). Esse embasamento nem sempre é compatível com a formação dos profissionais que trabalham com o projeto, a construção, a fiscalização e a manutenção das edificações.

A respeito dos aspectos operacionais, o tempo para a completa realização de uma simulação e a amigabilidade operacional são fatores determinantes na utilização voluntária de qualquer *software*, principalmente nas fases iniciais da projeção, onde as alternativas possíveis são inúmeras. Em ambos os aspectos, o FSD mostra-se incipiente. A ausência de uma interface amigável e gráfica para a entrada de dados, coerente com a prática projetual em arquitetura e o longo tempo de processamento são pontos a serem melhorados no FDS. A inserção de dados por meio de arquivo de texto praticamente inviabiliza a comparação, em tempo real, de alterações no modelo original, pois qualquer intervenção implica em retornar ao início do processo de redigir, linha por linha, as alterações realizadas.

A descrição dos dados de entrada via arquivo de texto torna-se especialmente trabalhosa e extensa à medida que se busca aproximar o modelo da realidade. Por exemplo, para a mera visualização da distribuição de fumaça no interior de um ambiente fechado, bastam algumas linhas de comando contendo informações referentes às dimensões do domínio, a definição da malha e a intensidade da chama. Entretanto, efetivar a interação do incêndio com as entidades do modelo e com as variáveis ambientais exige a fiel descrição das propriedades térmicas de cada variável. Nesse sentido, quanto mais a simulação tenta se aproximar da realidade, mais ela se afasta da prática projetual, uma vez que os conhecimentos exigidos para uma modelagem fidedigna fogem do escopo de conhecimento do arquiteto.

Os trabalhos publicados com o uso do FDS geralmente buscam reproduzir incêndios progressos ou ensaiados em laboratório, o que permite a adequada calibração do modelo por meio da comparação dos resultados da simulação com os dados coletados. No presente trabalho, a ausência do evento de referência expôs a dificuldade de simular incêndios hipotéticos, tendo em vista a grande quantidade de parâmetros exigidos para a correta definição da chama e dos subprodutos. A ausência de *templates* pré-configurados obriga o operador a atribuir valores, de difícil obtenção até mesmo na literatura especializada, às variáveis físico-químicas da combustão.

Entretanto, é imprescindível destacar que, enquanto a simulação impõe uma extensa lista de problemas de ordem teórica, um experimento físico apresenta uma gama de dificuldades de ordem prática, e é justamente na comparação com o ensaio experimental que as qualidades da simulação se sobressaem. A simulação é discreta, pode ser realizada em qualquer instante e em qualquer lugar, não apresenta custos expressivos a cada novo teste, não expõe o operador a riscos, não exige a mobilização de brigada de incêndio, não polui a atmosfera e nem gera resíduos. Constatado algum erro, a simulação pode ser automaticamente cancelada, corrigida e reiniciada em questão de minutos e os resultados já são automaticamente gravados digitalmente. No caso específico do FDS, a leitura dos resultados, por meio do *Smokeview*, é o extremo oposto da forma de entrada de dados: a interface de saída de dados é gráfica, intuitiva e dinâmica.

Conclui-se que a simulação computacional de incêndio ainda está fortemente vinculada à investigação de casos reais e, portanto, ainda pouco voltada para a prática projetual. O atual método de modelagem e de caracterização do incêndio desestimula a utilização do FDS, afastando-o das fases iniciais do processo de elaboração dos projetos. Logo, é possível afirmar que a desejável aproximação entre simulação de incêndio e processo projetual ainda depende de melhoramentos nos aspectos de ordem prática.

5.3 Desdobramentos e sugestões de trabalhos futuros

O presente documento sintetiza a pesquisa pioneira com o uso de simulação computacional de fluidos dentro da Base de Pesquisa LabSec/ Darq/ UFRN, sendo pioneira, também, no uso do CFD para modelagem de incêndio no PPGAU/ UFRN. Esperadamente, o desbravamento inicial no uso da simulação computacional revelou-se consideravelmente árduo, principalmente diante da ausência de parceiros próximos para auxiliar no aprendizado, na calibração dos modelos e na discussão dos resultados. Apesar das inevitáveis falhas, espera-se que o presente trabalho contribua na consolidação do tema SCIE diante da Área de Concentração 'Projeto, Morfologia e Conforto no Ambiente Construído', do PPGAU/ UFRN.

Apesar das limitações e da necessidade de validação experimental dos resultados, os benefícios proporcionados pela simulação computacional ao projeto arquitetônico são inquestionáveis. Assim, acredita-se que trabalhos futuros poderiam se concentrar em duas vertentes: o aperfeiçoamento do método de integração da simulação ao projeto e a avaliação do desempenho de elementos arquitetônicos. O aperfeiçoamento do método recai, invariavelmente, na elaboração de uma interface amigável ao usuário e compatível com o processo projetual, principalmente com as etapas iniciais. A elaboração de *plugins*, para os *softwares* CAD existentes, facilitaria enormemente a construção dos modelos tridimensionais virtuais. *Templates* pré-configurados de incêndio aplicáveis a qualquer modelo importado de um programa CAD, também contribuiria na celeridade da etapa de entrada de dados, eximindo o operador da definição dos parâmetros físico-químico do fogo.

A mitigação dos obstáculos meramente operacionais, fortemente ligados à etapa de entrada de dados, libertaria o projetista para concentrar-se na avaliação

crítica dos resultados. Desse modo, vislumbra-se a possibilidade de simular o desempenho de elementos arquitetônicos, tais como: brises, pérgolas, cobogós ou demais elementos de fachada semipermeáveis ao vento e à luz, e o comportamento do incêndio perante as condicionantes ambientais.

A simulação também pode ser utilizada como uma ferramenta de verificação do desempenho das prescrições normativas, durante o processo de revisão das Normas e Instruções Técnicas. Idealiza-se, de maneira bastante otimista, o emprego da simulação computacional de incêndio como ferramenta complementar à utilização das recomendações prescritivas, a exemplo do que a ABNT NBR 15575:2013 prevê para o desempenho térmico das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves. **A questão do escape em edifícios altos: A influência da fumaça de incêndio na proteção da vida.** In: Anais do I Congresso Ibero-latino Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI 2011, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 297-306. 2011 ISBN 978.989-97210-0-5.

ALVES, Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves. **A questão do escape em edifícios altos: A influência da fumaça de incêndio na proteção da vida.** Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília – FAU/UNB. Brasília, 2010. 286 p.

ALVES, Alessandra B. C. G.; CAMPOS, André T.; BRAGA, George C. B. **Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura.** In: NUTAU (Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo) 2008 - ESPAÇO SUSTENTÁVEL – INOVAÇÕES EM EDIFÍCIOS E CIDADES. Disponível em: <http://www.usp.br/nutau/CD/71%20196.pdf>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-119:** Standard test methods for fire tests of buildings construction and materials. Pensilvânia, EUA. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10898:** Sistemas de iluminação de emergência: Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR14100:** Proteção contra incêndio – Símbolos gráficos para Projeto: Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR9077:** Saídas de emergência em edifícios: Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR5627:** Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo – Procedimento: Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo: Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR9441**: Execução de sistemas de detecção e alarme: Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR9442**: Materiais de construção – Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante – método de ensaio: Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR10636**: Paredes e divisórias sem função estrutural – determinação da resistência ao fogo – método de ensaio: Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR10897**: Proteção contra incêndio por chuveiro automático – Procedimento: Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR11742**: Porta corta-fogo para saídas de emergência – Especificações: Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR11785**: Barra antipânico - Especificações: Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR12693**: Sistemas de proteção por extintores de incêndio: Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR13434-2**: Sinalização de segurança contra incêndio e pânico: Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR13714**: Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio: Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio: Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimentos: Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR15220**: Desempenho térmico de edificações: Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR15575:** Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho: Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA – AsBEA. **Guia sustentabilidade na arquitetura: diretrizes de escopo para projetistas e contratantes.** Grupo de Trabalho de Sustentabilidade AsBEA. São Paulo: Prata Design, 2012. ISBN 978-85-63604-03-3.

BERTO, Antonio Fernando. **Medidas de proteção contra incêndio: Aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP. São Paulo, 1991. 351 p.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT - BRE. **Things to do in BREEAM at the beginning.** Vídeo produzido por: BRE Group. Distribuído por: Vimeo.com. Bucknalls Lane / Reino Unido: 2015. 1. Internet. Disponível em: <<https://vimeo.com/131526397>>. Acessado em: 25 jun. 2015.

CAMPOS, André T.; BRAGA, George C. B.. **Aplicação do FDS + EVAC para validação de requisitos normativos de saída de emergência e comparação com parâmetros de desempenho.** In: Anais do I Congresso Ibero-latino Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI 2011, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 297-306. 2011. ISBN 978.989-97210-0-5.

CHEN, Q. **Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications.** In: Building and Environment. 1-11, 2008.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Instrução Normativa nº 003: Carga de Incêndio.** Secretaria de Estado da Segurança Pública. Diretoria de Atividades Técnicas – DAT. Santa Catarina, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO - CBPMESP. **Instrução Técnica nº 03/2004: Terminologia de Segurança contra Incêndio**. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2004.

_____. **Instrução Técnica nº 08/2011:** Resistência ao fogo dos elementos de construção. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2011.

_____. **Instrução Técnica nº 09/2011:** Compartimentação horizontal e compartimentação vertical. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2011.

_____. **Instrução Técnica nº 15-1/2011:** Controle de fumaça - Parte 1 – Regras gerais. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2011.

_____. **Instrução Técnica nº 15-3/2011:** Controle de fumaça - Parte 3 – Controle de fumaça natural em indústrias, depósitos e áreas de armazenamento em comércios. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2011.

_____. **Instrução Técnica nº 15-5/2011:** Controle de fumaça - Parte 5 – Controle de fumaça mecânico em edificações horizontais, áreas isoladas em um pavimento ou edificações que possuam seus pavimentos isolados. Secretaria de estado dos negócios da Segurança Pública. Corpo de bombeiros. São Paulo, 2011.

COSTA, Carla Neves; ONO, Rosária; SILVA, Valdir Pignatta: **A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio**. In: Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005, Recife/PE. 2005. (26p.) ISBN 85-98576-07-7.

DIREITO, Joana Ferreira. **Estudo da segurança contra incêndio em fachadas ventiladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Cidade do Porto/ Portugal. 2011.

FIRE PROTECTION ASSOCIATION – FPA. **Descripción de un incendio en una vivienda y su desarrollo**. Vídeo produzido por: Fire Protection Association. Distribuído por: CanalPack112. Salteras/ Espanha: 2012. 1. Internet. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bewbcSoDkYw>>. Acessado em: 2 jun. 2015.

FAKURY, Ricardo H.; CALDAS, Rodrigo B.; BRANCO, Alípio P. C. **Estudo de caso: Análise da estrutura metálica de readequação do Cine Brasil em Belo Horizonte em situação de incêndio** In: Anais: I Congresso Ibero-latino Americano sobre Segurança contra Incêndio, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 93-102. ISBN 978.989-97210-0-5.

GALLO, Jorge B.; AGNELLI, José A. M.. Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia:** Publicação oficial da Associação Brasileira de Polímeros - ABPol, São Carlos, Vol. 8, Issue 1, p. 23-38. Jan.- Mar.1998. ISSN 1678-5169.

GIACOMINI, Eliana. **Material o vidro**. Dissertação (Mestrado em Construções de Edifícios) - Secção de Construções Civas, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Cidade do Porto/ Portugal. 2004.

GISSI, Emanuele. **An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview: Updated to FDS 5.5.1 and Blender FDS**. 2010. 170 p. Disponível em: <https://sites.google.com/a/corbezzolo.org/pages/Home/download_FSE/>. Acessado em: 17 ago. 2015.

GOMES, Ary Gonçalves. **Sistemas de prevenção contra incêndio**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. ISBN: 85-7193-009-0.

GOUVEIA, Fabíola Bristot Serpa; SOUZA, João Carlos. **Aplicação do Sistema de Projeto Baseado em Desempenho para a Segurança Contra Incêndios em Edifícios Históricos**. In: NUTAU (Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo) 2008 - ESPAÇO SUSTENTÁVEL – INOVAÇÕES EM EDIFÍCIOS E CIDADES. Disponível em: <<http://www.usp.br/nutau/CD/147.pdf>>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DIS 16733-1: Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires — Part 1: Selection of design fire scenarios**. Gênova, 2006.

LUCENA, Fábio de Oliveira. **Monografia: Arte e técnica da construção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011. ISBN: 978-85-399-0085-5.

LUZ NETO, Manoel Altivo da. **Condições de segurança contra incêndio**. In: BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde. Série Saúde & Tecnologia — Textos de Apoio à Programação Física dos Estabelecimentos Assistenciais de Saúde — Condições de Segurança Contra Incêndio - Brasília, 1995.

MANZ, Heinrich; XU, Weiran e SEYMOUR, Mark. **Modeling smoke and fire in a hotel bedroom**. In: 8th Int. conference on air distribution in rooms - Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark, September 8–11, 2002, 4 p.

MARIANI, Leandro M. e SILVA, Luiz Carlos da. **Aplicação do programa Fire Dynamics Simulator em simulação de incêndio estrutural**. In: Anais do I Congresso Ibero-latino Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI 2011, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 297-306. 2011 ISBN 978.989-97210-0-5.

MAZZONI, Filipe. **Simulação computacional de incêndios: Aplicação no caso do condomínio edifício Cacique em Porto Alegre-RS**. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2010. 68 p.

McGRATTAN, Kelvin. **Fire Dynamics Simulator** (version 4) – Technical reference guide. Washington/ EUA: 2006, NIST Special publication 1018.

McGRATTAN, Kelvin; KLEIN, Bryan HOSTIKKA, Simo; FLOYD, Jason. **Fire Dynamics Simulator (Version 5): User's Guide**. Maryland - USA, 2007 NIST Special Publication 1019-5.

McGRATTAN, Kelvin, et al. **Fire Dynamics Simulator User's Guide: Sixth Edition**. NIST Special Publication 1019: National Institute of Standards and Technology - NIST, Maryland (EUA), 2014.

MORBITZER, C., et al. **Integration of building simulation into the design process of an architecture practice**. Building Simulation. 697 - 704, 2001.

MORAES, Poliana Dias de; ROSEMAN, Fernando; ROMAN, Humberto Ramos. **Análise numérico-experimental de paredes estruturais em bloco cerâmico sob situação de incêndio**. In: Anais do I Congresso Ibero-latino

Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI 2011, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 297-306. 2011. ISBN 978.989-97210-0-5.

MOUNT PENN FIRE COMPANY. **Flash Over Simulator**. Vídeo produzido por: Fire Fighters of the Mt Penn Volunteer Fire Co. Mount Penn/ Pensilvânia - EUA: 2013. 1. Internet. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=vfp9bGobW-I>>. Acessado em: 2 jun. 2015.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Tradução da quarta edição americana: Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. ISBN 85-212-0343-8

NEGRISOLO, Walter. **Segurança Contra Incêndio para Arquitetos Urbanistas**. (Slides). São Paulo: FAUUSP, 2013. Disponível em: <http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0188/Seguranca_Contra_Incendio_palestra.pdf>. Acessado em: 26/03/2014.

_____. **Arquitetando a segurança contra incêndio**. Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP. São Paulo, 2011. 415 p.: il.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NIST. **Fire Dynamics Simulator**, versão 6.1.2, 2014. Disponível em: < <https://code.google.com/p/fds-smv/>>.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NIST. **Smokeview**, versão 6.1.12, 2014. Disponível em: <<https://code.google.com/p/fds-smv/>>.

ONO, Rosaria. **Aspectos do projeto arquitetônico relevantes para a segurança contra incêndio**. Material didático referente ao Minicurso apresentado no 1º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança Contra Incêndio – CILASCI, Natal/RN. 2011.

_____. **O impacto do método de dimensionamento das saídas de emergência sobre o projeto arquitetônico de edifícios altos: uma análise crítica**

e proposta de aprimoramento. Tese (Livre docência em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP. São Paulo, 2010. 457 p.: il.

_____. **Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos**. In: Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-113, jan./mar. 2007.

ONO, Rosária; VALENTIM, Marcos V.. **Avaliação do desempenho de saídas de emergência utilizando modelos de simulação computacional**. . In: Anais do I Congresso Ibero-latino Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI 2011, de 10 a 12 de março de 2011, Natal, RN, Brasil/ ALBRASCI, UFRN – Natal, RN: Impressão Gráfica, 2011. Vol. 1, p. 297-306. 2011. ISBN 978.989-97210-0-5.

OVERHOLT, Kristopher. **Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator**. 2007. Disponível em: < <http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>> Acesso em: 25 mar. 2015.

PORANTIM, Maurício. **O Método hipotético-dedutivo**. Livre Pensamento, 2013. Disponível em: <<http://livrepensamento.com/2013/10/01/o-metodo-hipotetico-dedutivo/>>. Acessado em: 30 jun. 2015.

PRASAD, Kuldeep et al. **Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs**. In: 11th Fire and Materials International Conference. Conference Papers Proceedings. San Francisco, CA, 2009. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire09/art014.html>>. Acesso em: 26 mai. 2015.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DO PARANÁ. **Norma de Procedimento Técnico 009: Compartimentação horizontal e compartimentação vertical**. Corpo de Bombeiros de Cascavel. Cascavel, 2012.

ROBBINS, A.P.; WADE, C. A.. **Soot Yield Values for Modeling Purposes: Residential Occupancies**, BRANZ Study Report 185. BRANZ Ltd, Porirua, Nova Zelândia, 2007.

RODRIGUES, E. C. R. **Análise da eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre/ RS. 2009.

ROSA, Ari de Freitas Ferreira Neiva. **Segurança contra incêndio em discotecas.** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal. 2010

RUSCHEL, Fernanda. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre - RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre/ RS, 2011.

SANTOS, Elsa Cristina Oliveira Ferreira dos. **Segurança contra incêndio numa escola: Desenvolvimento de um modelo informático para verificação regulamentar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Cidade do Porto/ Portugal. 2010.

SCHEER, Sérgio, e BARANOSKI Emerson Luiz. **A utilização de simuladores de incêndio como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de projetos de arquitetura e de prevenção de incêndio.** In: VII Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios - VII WBGPPCE, Curitiba. 2007.

SEITO, Alexandre Itiu (coord.), et al.. **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto editora, 2008. 496p. ISBN: 978-85-61295-00-4.

SILVA, Eriberto Carlos Mendes da. **O projeto arquitetônico e a antecipação do projeto de segurança contra incêndio: interferência mútua, interação necessária.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/ RN, Brasil. 2015.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situações de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2004. ISBN 85-85570-04-0.

_____. **Segurança contra incêndio em edifícios: considerações para o projeto de arquitetura**. São Paulo: Blucher, 2014. ISBN 978-85-212-0775-7.

SILVA, Valdir. et al. **A real fire in small apartment – a case study**. In: Fourth International Workshop Structures in Fire, Aveiro (Portugal). 2006. 12p.

TAN, G. **Study of Natural Ventilation Design by Integrating the Multizone Model with CFD Simulation: Study of Natural Ventilation: Design by Integrating the Multizone Model with CFD Simulation**. 2005. 77 p. (Tese de Doutorado) - Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2005.

TRINDADE, S. C. **Ventilação natural em edifícios tipo galpão no clima de Natal/RN: aplicação de simulação computacional**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/ RN, Brasil, 2006.

VASCONCELOS, João Carlos Gaspar. **Método para estabelecimento de Medidas de segurança contra incêndio, ordenadas em função da razão eficácia/ custo**. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Saúde e Segurança) – Departamento de Biologia, Universidade de Açores, Ponta Delgada/ Portugal. 2008

VENEZIA, Adriana Portela Prado Galhano. **Parâmetros para o projeto arquitetônico sob o aspecto da segurança contra incêndio**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

VENEZIA, Adriana Portela Prado Galhano. **Avaliação de risco de incêndio para edificações hospitalares de grande porte: uma proposta de método qualitativo para análise de projeto**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAUUSP, São Paulo, 2011.

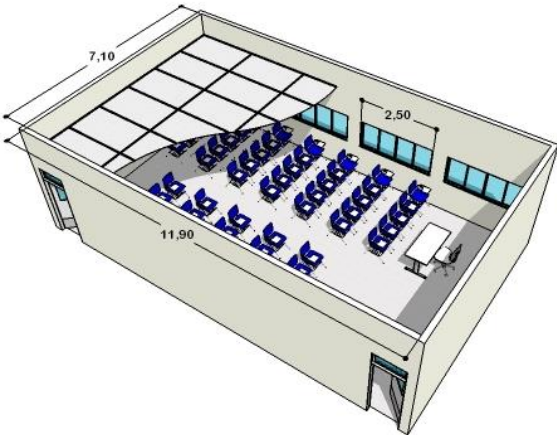
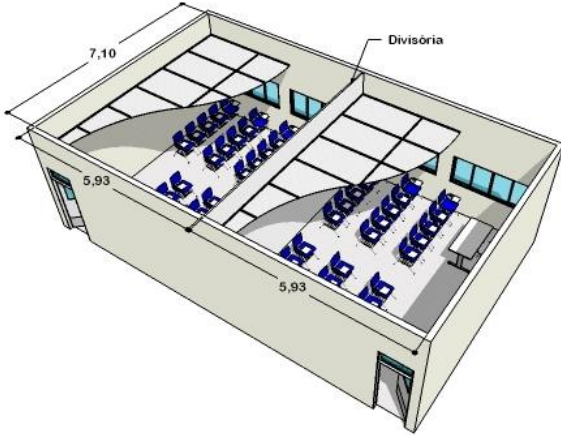
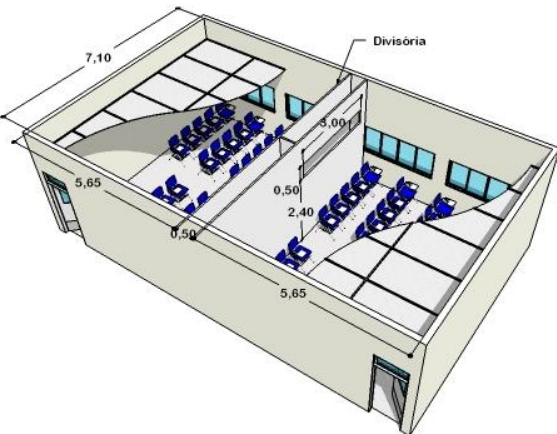
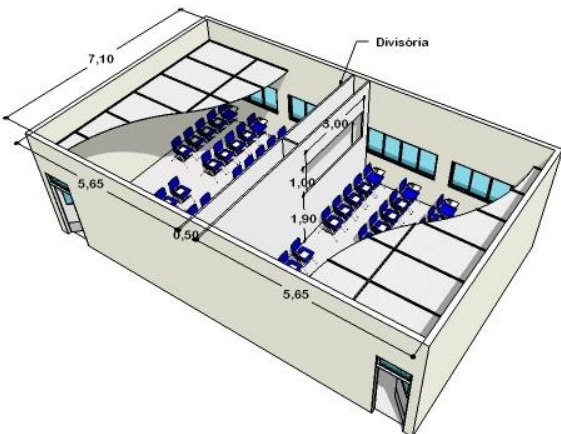
ZANCHETTA, Diego; CASTRO Fábio de. Impactos do incêndio de tanques em Santos vão durar 5 anos. **Estado** (Jornal), São Paulo. 12 abr. 2015. Estado Conteúdo. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,impactos-do-incendio-de-tanques-em-santos-vao-durar-5-anos,1668237>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

APÊNDICE A - TESTES PRELIMINARES

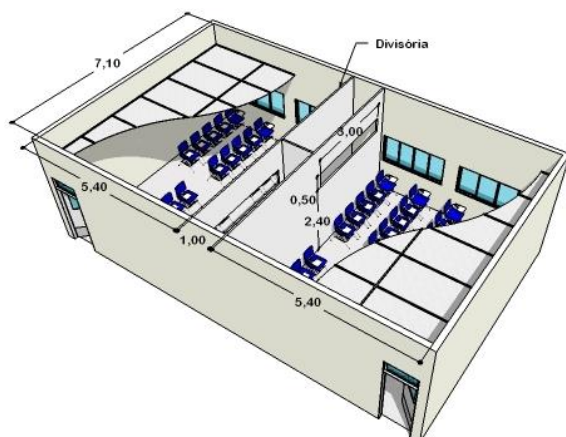
Os testes preliminares apresentados a seguir referem-se aos primeiros resultados consistentes e sistemáticos obtidos com a utilização do FDS. Representam um importante avanço na pesquisa, pois correspondem às primeiras simulações executadas a partir de um modelo e de condições de contorno totalmente elaboradas pelo autor da pesquisa, sem o uso dos arquivos de exemplo disponibilizados pelo *software* e citados no manual do usuário. Contudo, como é próprio de estudos incipientes, trata-se de modelos com significativas simplificações geométricas e de condições de contorno com certo grau de arbitrariedade, a exemplo do valor adotado no parâmetro 'SOOT_YELD' de 0,5 [50%]. Os animadores resultados obtidos nos testes preliminares confirmaram a competência do FDS para o propósito da pesquisa e instigaram o aprofundamento no aprendizado do *software*, bem como o interesse em aperfeiçoar a geometria do modelo e as condições de contorno.

Definição dos modelos dos testes preliminares

Os quatro casos de compartimentação seletiva correspondem a duas variações tanto na altura da abertura na divisória quanto na largura da abertura na laje. Em todos os casos, foram simuladas duas situações, considerando as esquadrias do ambiente incendiado fechadas ou abertas. O resumo dos casos simulados está descrito na tabela a seguir.

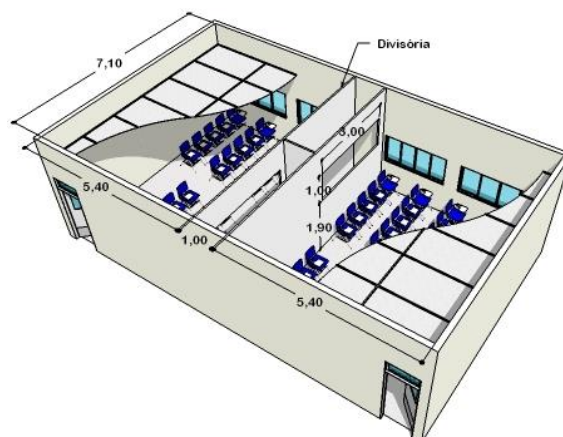
CASO/DESCRIÇÃO	CASO/DESCRIÇÃO
Representação dos casos 'CB' e 'CB_open'  Descrição: Corresponde ao caso-base: sala com dimensões internas de 11,90 x 7,10m, livre de subdivisões internas.	Representação dos casos 'DIV' e 'DIV_open'  Descrição: Caso-base com uma divisória transversal central.
Representação dos casos '50-50' e '50-50_open'  Descrição: altura da abertura na divisória e largura da abertura na laje = 50 cm.	Representação dos casos '50-100' e '50-100_open'  Descrição: altura da abertura na divisória = 100 cm e largura da abertura na laje = 50 cm.

Representação dos casos '100-50' e '100-50_open'



Descrição: altura da abertura na divisória = 50 cm e largura da abertura na laje = 100 cm.

Representação dos casos '100-100' e '100-100_open'



Descrição: altura da abertura na divisória e largura da abertura na laje = 100 cm.

Resultados dos testes preliminares

Ciente da possível imprecisão contida nos valores absolutos resultante das simulações, as análises a seguir serão baseadas, principalmente, na comparação dos resultados, tomando os casos 'CB' e 'DIV' como referência. A primeira comparação corresponde aos efeitos resultantes da instalação de uma divisória simples, particionando o ambiente original em duas salas menores. Reduzindo-se pela metade o volume da sala, o tempo para a camada de fumaça atingir o nível do solo foi igualmente reduzido à metade (Imagem 1 e Imagem 2).

Imagem 1 – Caso 'CB': Fumaça ocupa todo o ambiente aos 30s

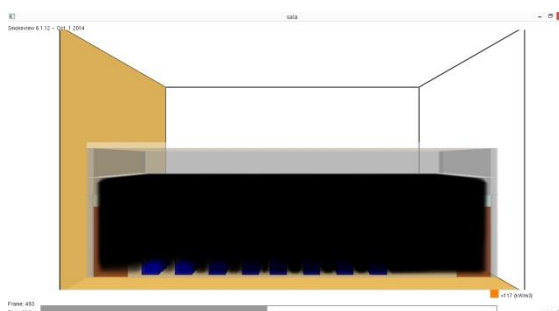
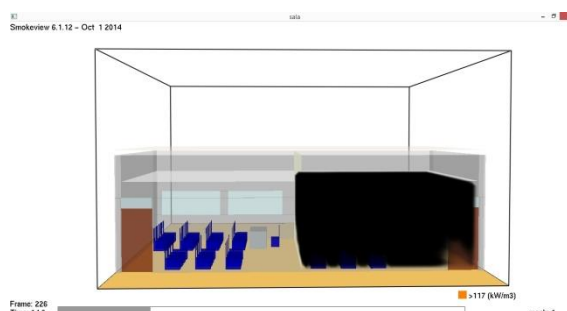


Imagem 2 – Caso 'DIV': Fumaça ocupa todo o ambiente aos 14s



Em todos os casos que dispunham de compartimentação seletiva, o tempo necessário para a fumaça alcançar a abertura de exaustão da divisória foi inferior a 5 segundos, lembrando que as chamas foram posicionadas na extremidade oposta à abertura da divisória (Imagem 3 e Imagem 4).

Imagem 3 – Caso 'DIV50-50': Início da atuação da compartimentação seletiva na exaustão da fumaça aos 5s

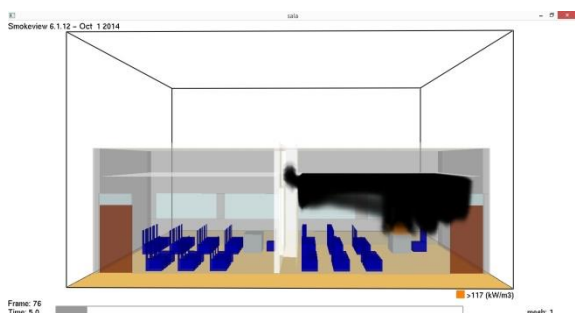
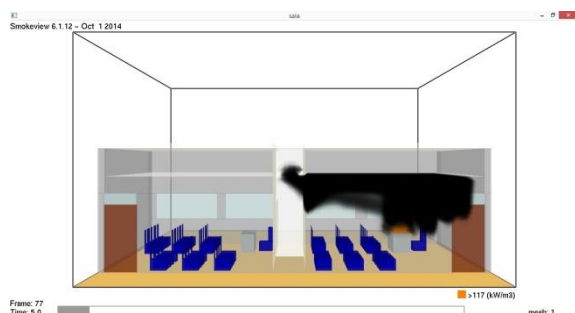


Imagem 4 – Caso 'DIV100-100': Início da atuação da compartimentação seletiva na exaustão da fumaça aos 5s



Nas simulações com portas e janelas abertas, representada pelos casos CB_open e DIV_open, a divisória reduziu à metade a área de abertura disponível para a exaustão. Logo, a altura da camada de fumaça foi sensivelmente reduzida, uma vez que a taxa de liberação de fumaça permaneceu constante em todos os casos (Imagem 5 e Imagem 6).

Imagem 5 – Caso 'CB_open': altura da camada de fumaça estabilizada aos 30s

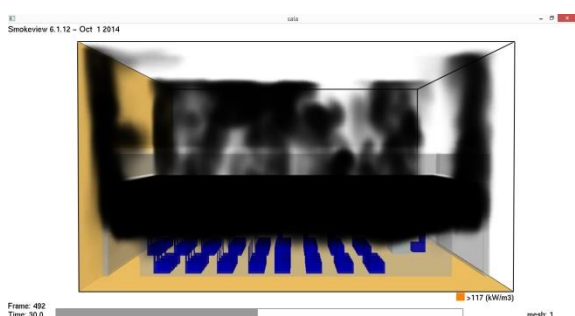
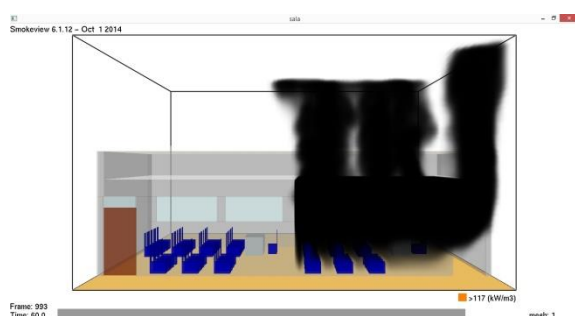


Imagem 6 – Caso 'DIV_open': altura da camada de fumaça estabilizada aos 60s.



Os benefícios proporcionados pela compartimentação seletiva foram o aumento da camada livre de fumaça, nos casos com porta e janela abertas, e o incremento no tempo necessário para a camada de fumaça ocupar todo o ambiente, nos casos com as esquadrias fechadas. A comparação utilizou os casos 'DIV_open' e 'DIV' como referência, respectivamente.

Comparando os casos 'DIV_open' (Imagem 6) e 'DIV50-50_open' (Imagem 7), nota-se o aumento na altura da camada livre de fumaça. Se a comparação for com o caso 'DIV100-100_open' (Imagem 8), nota-se que a altura da camada livre mais do que dobra de tamanho.

Imagem 7 – Caso ‘DIV50-50_open’ com altura da camada de fumaça estabilizada aos 60s

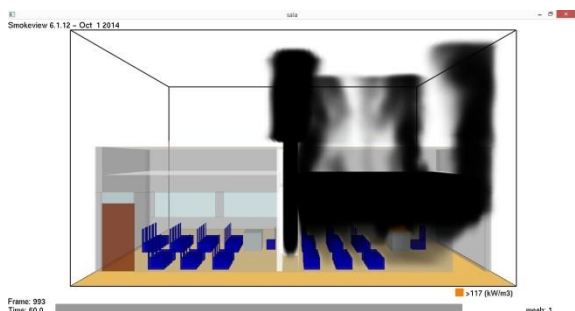
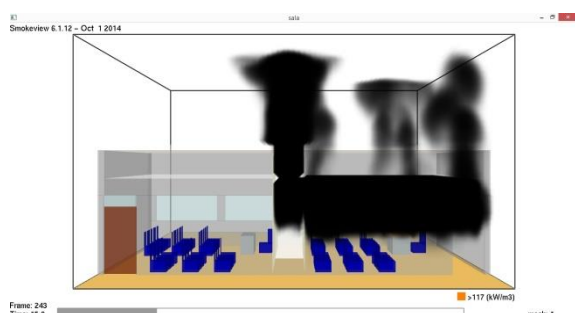
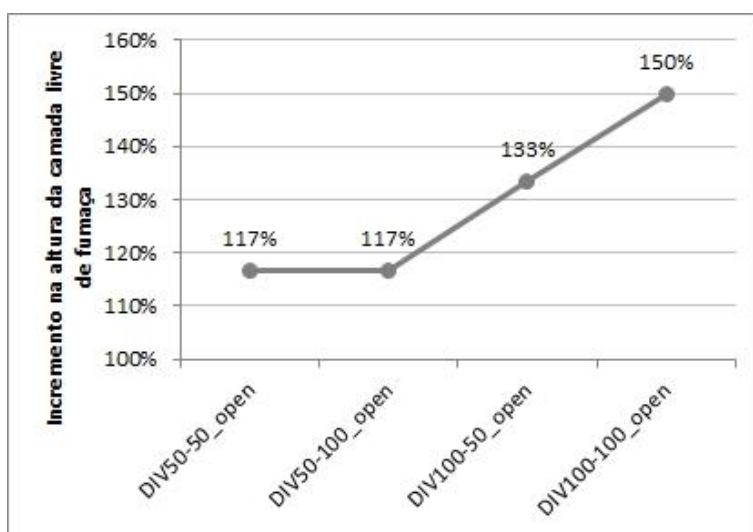


Imagem 8 – Caso ‘DIV100-100_open’ com altura da camada de fumaça estabilizada aos 15s



Chama a atenção os resultados dos casos ‘DIV50-50_open’ e ‘DIV50-100_open’, que apresentaram altura da camada livre de fumaça praticamente igual (Imagem 9). Constata-se, portanto, que o aumento da abertura na laje pode se tornar inócua quando a capacidade de exaustão da abertura na divisória estiver saturada.

Imagem 9 – Gráfico do incremento na altura estimada da camada livre de fumaça, em relação ao caso com divisória simples.



Os resultados mostraram que a compartimentação seletiva, da forma como foi proposta, não foi capaz de promover sozinha a exaustão completa da fumaça gerada, uma vez que em todos os casos nos quais as portas e janelas estavam fechadas, a camada de fumaça conseguiu atingir o nível do piso. (Imagem 10 e Imagem 11).

Imagem 10 – Caso ‘DIV50-50’ completamente tomado pela fumaça aos 60s

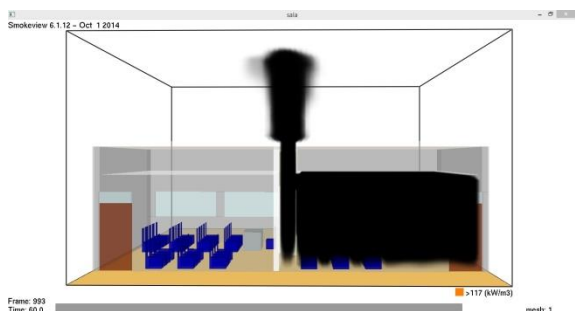
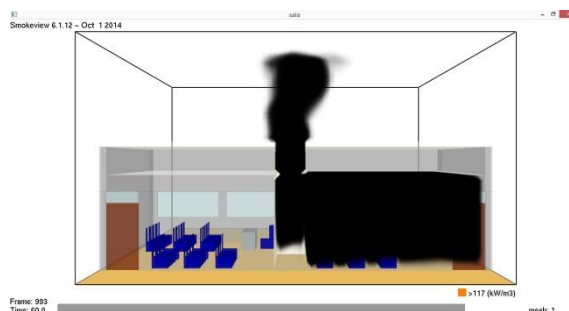
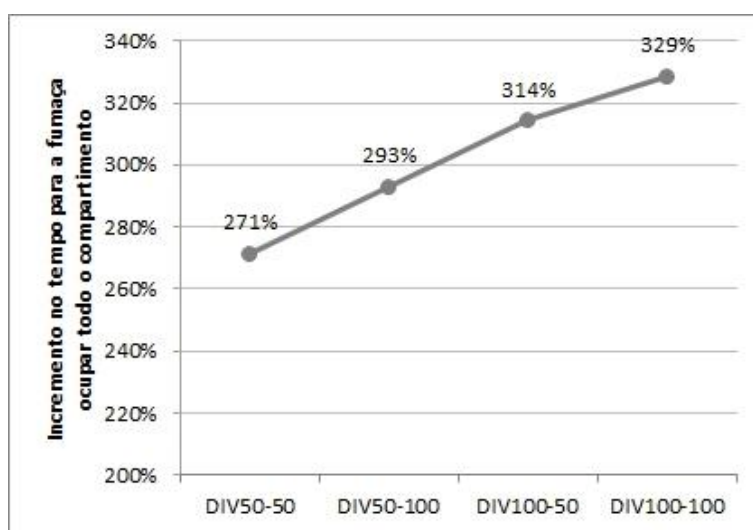


Imagem 11 – Caso ‘DIV50-100’ tomado pela fumaça aos 60s



Entretanto, observa-se um incremento significativo no tempo necessário para a fumaça ocupar todo o ambiente. Tomando o caso ‘DIV’ como referência, nota-se que esse intervalo é até quatro vezes maior com a presença da compartimentação horizontal seletiva (Imagem 12).

Imagem 12 – Gráfico do incremento no tempo necessário para a fumaça ocupar todo o compartimento, em relação ao caso com divisória simples



De fato, enquanto que no caso ‘DIV’ a fumaça ocupa o ambiente aos 14 segundo de simulação (), no caso ‘DIV100-100’ o mesmo só ocorre aos 60 segundos (Imagem 13 e Imagem 14).

Imagem 13 – Caso 'DIV' completamente tomado pela fumaça aos 14s

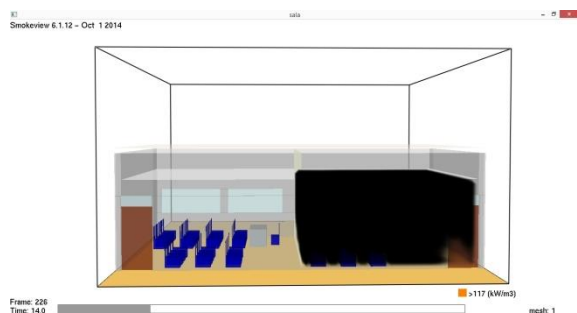
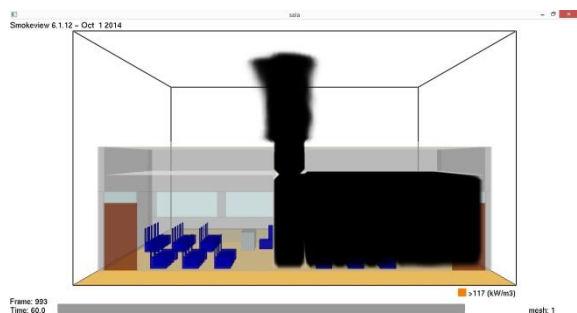


Imagem 14 – Caso 'DIV100-100' tomado pela fumaça aos 60s



**APÊNDICE B - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EMPREGADOS NAS
SIMULAÇÕES DEFINITIVAS– PARÂMETRO “&MATL ID”**

MATERIAL	EMISSIVIDADE	CONDUTIVIDADE (W/(m.K))	CALOR ESPECÍFICO (J/(kg.K))	DENSIDADE DE MASSA APARENTE (kg/m³)	CALOR DE COMBUSTÃO (kJ/m³)
Espuma rígida de poliuretano	0,90*	0,03*	1,67*	35*	805.000**
Gesso	0,90*	0,35*	0,84*	875*	-
Aço	0,25*	55*	0,46*	7800*	-
Lã de vidro	0,90*	0,045*	0,70*	55*	825.000**
Concreto	0,90*	1,75*	1,00*	2300*	-
Alvenaria	0,90*	1,15*	1,00*	1900*	-
Vidro	0,84*	1,00*	0,84*	2500*	-
PVC	0,90	0,20*	1,00	1300*	23.400.000**
Plástico	0,90	0,40*	1,00	1300*	41.600.000**
Tecido	0,90	0,40	1,00	900	18.900.000**
Compensado	0,90*	0,15*	2,30*	500*	8.500.000**
Alumínio	0,12*	230*	0,88*	2700*	-

(*) Fonte: NBR 15220:2005.

(**) Fonte: Instrução Normativa nº 003 (CBMSC, 2014), convertido para a unidade adotada pelo FDS.

APÊNDICE C - PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES – PARÂMETRO “&SURF ID”

SUPERFÍCIE	MATERIAL	COMBUSTÍVEL	ESPESSURA (m)	TEMPERATURA DE IGNIÇÃO (°C)
Estofado	Espuma rígida de poliuretano	Sim	0,05	415*
Divisória de gesso	Gesso	Não	0,05	-
Peça de aço	Aço	Não	0,03	-
Forro acústico	Lã de vidro	Sim	0,03	240
Parede concreto	Concreto	Não	0,15	-
Laje concreto			0,20	
Parede comum	Alvenaria	Não	0,15	-
Divisória vidro	Vidro	Não	0,003	-
Placa PVC	PVC	Sim	0,05	380
Objeto plástico	Plástico	Sim	0,05	320
Mesa plástico			0,05	
Lâmina	Tecido	Sim	0,01	400*
Tampo compensado	Compensado	Sim	0,03	220
Porta Compensado			0,03	
Peça alumínio	Alumínio	Não	0,05	-

(*) Fonte: GALLO e AGNELLI, 1998.

APÊNDICE D – ARQUIVO DE ENTRADO DE DADOS DO CASO ‘CBplus’

&HEAD CHID='CBplus', TITLE='Sala de aula grande malha 10cm, elementos que queimam, esquadrias acionaveis, dominio expandido em 1,0m no eixo Z' /

&MESH IJK=122,84,50, XB=0,12.2,1.9,10.3,0,5 / 72,48,24[coarse] 180,120,60[moderate] 270,192,90[fine]

&TIME T_END=300/

&DUMP DT_RESTART=5/

&MISC RESTART=.FALSE.

TMPA=25.

CONSTANT_SPECIFIC_HEAT_RATIO=.TRUE.

STRATIFICATION=.FALSE./

&RADI RADIATION=.FALSE. /

&REAC FUEL='POLYURETHANE'

FYI= 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'

SOOT_YIELD= 0.05

N= 1.0

C= 6.3

H= 7.1

O= 2.1 /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=12000. RAMP_Q='fireramp' /

&VENT XB=10,10,8.2,8.4,0.75,1.2, COLOR='ORANGE', SURF_ID='BURNER' DEVC_ID='timer 1' /sumir com a superficie queimadora

&DEVC XYZ=10,8.3,0.95 , ID='timer 1', SETPOINT= 300., QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.true./

&RAMP ID='fireramp', T=0, F=0 /

&RAMP ID='fireramp', T=60, F=0.04 /

&RAMP ID='fireramp', T=120, F=0.16 /

&RAMP ID='fireramp', T=180, F=0.36 /

&RAMP ID='fireramp', T=240, F=0.64 /

&RAMP ID='fireramp', T=300, F=1 /

&OBST XB=0,12.2,2.4,2.55,2.5,3.8, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede frontal 01

&OBST XB=0,0.25,2.4,2.55,0,2.5, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede frontal 02

&OBST XB=1.15,11.05,2.4,2.55,0,2.5, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede frontal 03

&OBST XB=11.95,12.20,2.4,2.55,0,2.5, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede frontal 04

&OBST XB=0,12.2,9.65,9.8,0,1.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 01

&OBST XB=0,12.2,9.65,9.8,2.1,3.8, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 02

&OBST XB=0,0.35,9.65,9.8,1.1,2.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 03

&OBST XB=2.85,3.2,9.65,9.8,1.1,2.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 04
 &OBST XB=5.7,6.2,9.65,9.8,1.1,2.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 05
 &OBST XB=8.7,9.15,9.65,9.8,1.1,2.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 06
 &OBST XB=11.65,12.2,9.65,9.8,1.1,2.1, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede com janelas 07
 &OBST XB=0,0.15,2.55,9.65,0,3.8, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede lateral esquerda
 &OBST XB=12.05,12.20,2.55,9.65,0,3.8, SURF_ID='PAREDE COMUM', /parede lateral direita
 &OBST XB=0.15,12.2,2.4,9.8,3.8,4, SURF_ID='LAJE CONCRETO', /laje 01
 &OBST XB=0.25,1.15,2.45,2.5,0,2.1, SURF_ID='PORTA COMPENSADO', /porta 01
 &OBST XB=0.25,1.15,2.45,2.5,2.1,2.5, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper01' /sumir
 com a bandeira porta 01
 &DEVC XYZ=0.7,2.5,2.3 , ID='temper01', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./
 &OBST XB=11.05,11.95,2.45,2.5,0,2.1, SURF_ID='PORTA COMPENSADO', /porta 02
 &OBST XB=11.05,11.95,2.45,2.5,2.1,2.5, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper02'
 /sumir com a bandeira porta 02
 &DEVC XYZ=11.5,2.5,2.3 , ID='temper02', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./
 &OBST XB=0.35,2.85,9.7,9.75,1.1,2.1, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper03' /sumir
 com a janela01
 &DEVC XYZ=1.6,9.7,1.6 , ID='temper03', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./
 &OBST XB=3.2,5.7,9.7,9.75,1.1,2.1, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper04' / sumir
 com a janela02
 &DEVC XYZ=4.45,9.7,1.6 , ID='temper04', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./
 &OBST XB=6.2,8.7,9.7,9.75,1.1,2.1, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper05' / sumir
 com a janela03
 &DEVC XYZ=7.45,9.7,1.6 , ID='temper05', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./
 &OBST XB=9.15,11.65,9.7,9.75,1.1,2.1, SURF_ID='DIVISORIA VIDRO', DEVC_ID='temper06' / sumir
 com a janela04
 &DEVC XYZ=10.4,9.7,1.6 , ID='temper06', SETPOINT= 500., QUANTITY='TEMPERATURE',
 INITIAL_STATE=.true./

&MULT ID='f1', DX=1.475, DY=1, I_LOWER=0, I_UPPER=7, J_LOWER=0, J_UPPER=6 /
 &OBST XB=0.25,1.625,2.65,3.55,3,3.10, MULT_ID='f1', SURF_ID='FORRO ACUSTICO', /placas de
 forro
 &MULT ID='f2', DY=1, J_LOWER=0, J_UPPER=7 /
 &OBST XB=0.15,12.05,2.55,2.65,3,3.10, MULT_ID='f2', SURF_ID='PECA DE ALUMINIO', /perfis de
 aluminio longos
 &MULT ID='f3', DX=1.475, DY=1, I_LOWER=0, I_UPPER=8, J_LOWER=0, J_UPPER=6 /
 &OBST XB=0.15,0.25,2.65,3.55,3,3.10, MULT_ID='f3', SURF_ID='PECA DE ALUMINIO', /perfis de
 aluminio curtos

&OBST XB=0.3,2.9,9.55,9.65,2.2,2.3, SURF_ID='OBJETO PLASTICO' / suporte persiana janela 01

&OBST XB=3.1,5.8,9.55,9.65,2.2,2.3, SURF_ID='OBJETO PLASTICO'/ suporte persiana janela 02
 &OBST XB=6.1,8.8,9.55,9.65,2.2,2.3, SURF_ID='OBJETO PLASTICO'/ suporte persiana janela 03
 &OBST XB=9.05,11.75,9.55,9.65,2.2,2.3, SURF_ID='OBJETO PLASTICO'/ suporte persiana janela 04

&MULT ID='j1', DX=0.05, I_LOWER=0, I_UPPER=51, /

&OBST XB=0.3,0.3,9.55,9.65,1,2,2, MULT_ID='j1', SURF_ID='LAMINA'/ persiana janela 01
 &OBST XB=3.1,3.1,9.55,9.65,1,2,2, MULT_ID='j1', SURF_ID='LAMINA'/ persiana janela 02
 &OBST XB=6.1,6.1,9.55,9.65,1,2,2, MULT_ID='j1', SURF_ID='LAMINA'/ persiana janela 03
 &OBST XB=9.05,9.05,9.55,9.65,1,2,2, MULT_ID='j1', SURF_ID='LAMINA'/ persiana janela 02

&OBST XB=11.95,12,8,9,0,2, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /fundo armario
 &OBST XB=11.45,11.95,8,8.05,0,2, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /lateral 01 armario
 &OBST XB=11.45,11.95,8.95,9,0,2, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /lateral 02 armario
 &OBST XB=11.4,11.45,8,8.5,0.05,2, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /porta01 armario
 &OBST XB=11.4,11.45,8.5,9,0.05,2, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /porta02 armario
 &OBST XB=11.35,11.95,8.05,8.95,0,0.05, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /base armario
 &OBST XB=11.35,12,8,9,2,2.05, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /tampo armario
 &MULT ID='a1', DZ=0.55, K_LOWER=0, K_UPPER=2 /

&OBST XB=11.45,11.95,8.05,8.95,0.5,0.55, MULT_ID='a1', SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /prateleiras armario
 &OBST XB=11.3,11.4,8.4,8.45,1,1.1, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /puxador 01 armario
 &OBST XB=11.3,11.4,8.55,8.6,1,1.1, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /puxador 02 armario

&OBST XB=10,10.05,6.075,6.125,2.65,3.8, SURF_ID='PECA DE ACO', / suporte data show
 &OBST XB=9.975,10.075,6.05,6.15,2.60,2.65, SURF_ID='PECA DE ACO', / base suporte data show
 &OBST XB=9.85,10.15,6,6.2,2.45,2.6, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /data show

&OBST XB=9.9,10.5,7,8.5,0.7,0.75, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /tampo da mesa
 &OBST XB=9.9,10.5,7,7.05,0,0.7, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /suporte esquerdo da mesa
 &OBST XB=9.9,10.5,8.45,8.5,0,0.7, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /suporte direito da mesa
 &OBST XB=10.1,10.15,7.05,8.45,0.5,0.7, SURF_ID='TAMPO COMPENSADO', /travessao da mesa

&MULT ID='m1', DX=1, DY=0.6, I_LOWER=0, I_UPPER=8, J_LOWER=0, J_UPPER=4 /
 &MULT ID='m2', DX=1, DY=0.6, I_LOWER=0, I_UPPER=7, J_LOWER=0, J_UPPER=3 /
 &OBST XB=0.5,1,6.6,7,0.35,0.4, SURF_ID='ESTOFADO', MULT_ID='m1' / assento cadeira E1
 &OBST XB=0.5,0.55,6.6,7,0.4,0.8, SURF_ID='ESTOFADO', MULT_ID='m1' / encosto cadeira E1
 &OBST XB=0.7,1,6.55,6.8,0.6,0.65, SURF_ID='MESA PLASTICO', MULT_ID='m1' / mesa cadeira E1
 &OBST XB=0.5,0.55,6.55,6.6,0,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / pe posterior direito cadeira E1
 &OBST XB=0.95,1,6.55,6.6,0,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / pe anterior direito cadeira E1

&OBST XB=0.5,0.55,7,7.05,0,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / pe posterior esquerdo cadeira E1

&OBST XB=0.95,1,7,7.05,0,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / pe anterior esquerdo cadeira E1

&OBST XB=0.5,1,6.55,6.6,0.55,0.6, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / apoio de braco da cadeira E1

&OBST XB=0.5,1,7,7.05,0.35,0.4, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / trava pes esquerdos da cadeira E1

&OBST XB=0.5,0.55,6.6,7,0.3,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / travessao posterior da cadeira E1

&OBST XB=0.95,1,6.6,7,0.3,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m1' / travessao anterior da cadeira E1

&OBST XB=1.5,2,2.8,3.2,0.35,0.4, SURF_ID='ESTOFADO', MULT_ID='m2' / assento cadeira A2

&OBST XB=1.5,1.55,2.8,3.2,0.4,0.8, SURF_ID='ESTOFADO', MULT_ID='m2' / encosto cadeira A2

&OBST XB=1.7,2,2.75,3,0.6,0.65, SURF_ID='MESA PLASTICO', MULT_ID='m2' / mesa da cadeira A2

&OBST XB=1.5,1.55,2.75,2.8,0,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / pe posterior direito cadeira A2

&OBST XB=1.95,2,2.75,2.8,0,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / pe anterior direito cadeira A2

&OBST XB=1.5,1.55,3.2,3.25,0,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / pe posterior esquerdo cadeira A2

&OBST XB=1.95,2,3.2,3.25,0,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / pe anterior esquerdo cadeira A2

&OBST XB=1.5,2,2.75,2.8,0.55,0.6, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / apoio de braco da cadeira A2

&OBST XB=1.5,2,3.2,3.25,0.35,0.4, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / trava pes esquerdos da cadeira A2

&OBST XB=1.5,1.55,2.8,3.2,0.3,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / travessao posterior da cadeira A2

&OBST XB=1.95,2,2.8,3.2,0.3,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', MULT_ID='m2' / travessao anterior da cadeira A2

&OBST XB=10.6,11.1,7.55,7.95,0.35,0.4, SURF_ID='ESTOFADO', / assento cadeira PROFESSOR

&OBST XB=11.05,11.1,7.55,7.95,0.4,0.8, SURF_ID='ESTOFADO', / encosto cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.725,7.775,0.05,0.3, SURF_ID='PECA DE ACO', / suporte cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.6,11.1,7.725,7.775,0,0.05, SURF_ID='PECA DE ACO', / pe 01 cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.55,7.725,0,0.05, SURF_ID='PECA DE ACO', / pe 02 cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.725,7.95,0,0.05, SURF_ID='PECA DE ACO', / pe 03 cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.5,8,0.3,0.35, SURF_ID='PECA DE ACO', / travessao cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.5,7.55,0.35,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', / suporte de braco 01 cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.825,10.875,7.95,8,0.35,0.55, SURF_ID='PECA DE ACO', / suporte de braco 02
cadeira PROFESSOR

&OBST XB=10.7,11,7.5,7.55,0.55,0.6, SURF_ID='ESTOFADO', / apoio de braco 01 cadeira
PROFESSOR

&OBST XB=10.7,11,7.95,8,0.55,0.6, SURF_ID='ESTOFADO', / apoio de braco 02 cadeira
PROFESSOR

&OBST XB=10,10.4,8.2,8.4,0.75,1.2, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /cpu

&OBST XB=10.1,10.2,7.55,7.95,0.75,1.2, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /monitor

&OBST XB=10.2,10.4,7.55,7.95,0.75,0.8, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /teclado

&OBST XB=10.3,10.4,8.05,8.15,0.75,0.8, SURF_ID='OBJETO PLASTICO', /mouse

&OBST XB=12,12.05,4.6,7.6,0.8,2, SURF_ID='DIVISORIA COMPENSADO', /quadro negro

&MATL ID = 'ESPUMA_RIGIDA_POLIURETANO'

EMISSIVITY = 0.9

CONDUCTIVITY = 0.03

SPECIFIC_HEAT = 1.67

DENSITY = 35

HEAT_OF_COMBUSTION = 805000

SPEC_ID = POLYURETHANE /

&SURF ID = 'ESTOFADO'

MATL_ID = 'ESPUMA_RIGIDA_POLIURETANO'

COLOR = 'NAVY'

TRANSPARENCY=0.9

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.05

BURN_AWAY = .TRUE.

IGNITION_TEMPERATURE = 250/

&MATL ID = 'GESSO'

EMISSIVITY = 0.9

CONDUCTIVITY = 0.35

SPECIFIC_HEAT = 0.84

DENSITY = 875 /

&SURF ID = 'DIVISORIA GESSO'

MATL_ID = 'GESSO'

COLOR = 'BEIGE'

TRANSPARENCY = 0.8

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.05 / espessura do elemento

&MATL ID = 'ACO'

EMISSION = 0.25

CONDUCTIVITY = 55

SPECIFIC_HEAT = 0.46

DENSITY = 7800 /

&SURF ID = 'PECA DE ACO'

MATL_ID = 'ACO'

COLOR = 'BISQUE 3'

TRANSPARENCY = 1

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.03 / espessura do elemento

&MATL ID = 'LA_DE_VIDRO'

EMISSION = 0.9

CONDUCTIVITY = 0.045

SPECIFIC_HEAT = 0.70

DENSITY = 55

HEAT_OF_COMBUSTION = 825000/ valores NBR 15220 e IN 003 (CBMSC,2104)

&SURF ID = 'FORRO ACUSTICO'

MATL_ID = 'LA_DE_VIDRO'

COLOR = 'WHITE'

TRANSPARENCY = 0.6

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.03

BURN_AWAY = .TRUE.

IGNITION_TEMPERATURE = 240/

&MATL ID = 'CONCRETO'

EMISSION = 0.9

CONDUCTIVITY = 1.75

SPECIFIC_HEAT = 1

DENSITY = 2300 /

&SURF ID = 'PAREDE CONCRETO'

MATL_ID = 'CONCRETO'

COLOR = 'ANTIQUE WHITE'
 TRANSPARENCY=0.3
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.15 / espessura do elemento

&SURF ID = 'LAJE CONCRETO'
 MATL_ID = 'CONCRETO'
 COLOR = 'ANTIQUE WHITE'
 TRANSPARENCY=0.4
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.20 / espessura do elemento

&MATL ID = 'COMUM'
 EMISSIVITY = 0.9
 CONDUCTIVITY = 1.15
 SPECIFIC_HEAT = 1
 DENSITY = 1900 /

&SURF ID = 'PAREDE COMUM'
 MATL_ID = 'COMUM'
 COLOR = 'GRAY'
 TRANSPARENCY=0.5
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.15 / espessura do elemento

&MATL ID = 'VIDRO'
 EMISSIVITY = 0.84
 CONDUCTIVITY = 1
 SPECIFIC_HEAT = 0.84
 DENSITY = 2500 /

&SURF ID = 'DIVISORIA VIDRO'
 MATL_ID = 'VIDRO'
 COLOR = 'SKY BLUE'
 TRANSPARENCY=0.2
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.003 / espessura do elemento

&MATL ID = 'PVC'
 EMISSIVITY = 0.9

CONDUCTIVITY = 0.2
 SPECIFIC_HEAT = 1
 DENSITY = 1300
 HEAT_OF_COMBUSTION = 23400000/

&SURF ID = 'PLACA PVC'
 MATL_ID = 'PVC'
 COLOR = 'NAVY'
 TRANSPARENCY=0.9
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.05
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 380/

&MATL ID = 'PLASTICO'
 EMISSIVITY = 0.9
 CONDUCTIVITY = 0.4
 SPECIFIC_HEAT = 1
 DENSITY = 800
 HEAT_OF_COMBUSTION = 41600000/

&SURF ID = 'OBJETO PLASTICO'
 MATL_ID = 'PLASTICO'
 COLOR = 'IVORY BLACK'
 TRANSPARENCY=0.85
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.05
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 320/

&SURF ID = 'MESA PLASTICO'
 MATL_ID = 'PLASTICO'
 COLOR = 'CADET BLUE'
 TRANSPARENCY=0.6
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.05
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 320/

&MATL ID = 'TECIDO'

EMISSIVITY = 0.9
 CONDUCTIVITY = 0.4
 SPECIFIC_HEAT = 1
 DENSITY = 900
 HEAT_OF_COMBUSTION = 18900000/

&SURF ID = 'LAMINA'
 MATL_ID = 'TECIDO'
 COLOR = 'KHAKI'
 TRANSPARENCY=0.8
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.01
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 150/

&MATL ID = 'COMPENSADO'
 EMISSIVITY = 0.9
 CONDUCTIVITY = 0.15
 SPECIFIC_HEAT = 2.3
 DENSITY = 500
 HEAT_OF_COMBUSTION = 8500000/

&SURF ID = 'DIVISORIA COMPENSADO'
 MATL_ID = 'COMPENSADO'
 TRANSPARENCY=0.65
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.05
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 220/

&SURF ID = 'TAMPO COMPENSADO'
 MATL_ID = 'COMPENSADO'
 COLOR = 'AZURE 3'
 TRANSPARENCY=0.9
 BACKING = 'EXPOSED'
 THICKNESS = 0.03
 BURN_AWAY = .TRUE.
 IGNITION_TEMPERATURE = 220 /

&SURF ID = 'PORTA COMPENSADO'

```

MATL_ID = 'COMPENSADO'
COLOR = 'MELON'
TRANSPARENCY=0.5
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.03
BURN_AWAY = .TRUE.
IGNITION_TEMPERATURE = 220/

```

```

&MATL ID = 'ALUMINIO'
EMISSION = 0.12
CONDUCTIVITY = 230
SPECIFIC_HEAT = 0.88
DENSITY = 2700 /

```

```

&SURF ID = 'PECA DE ALUMINIO'
MATL_ID = 'ALUMINIO'
COLOR = 'GRAY'
TRANSPARENCY = 0.9
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.05 / espessura do elemento

```

```

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /significa dizer que esta face do dominio funciona como uma
abertura

```

```

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /significa dizer que esta face do dominio funciona como uma
abertura

```

```

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /significa dizer que esta face do dominio funciona como uma
abertura

```

```

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /significa dizer que esta face do dominio funciona como uma
abertura

```

```

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /significa dizer que esta face do dominio funciona como uma
abertura

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,2.1, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='2.1' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,1.8, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='1.8' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,1.5, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='1.5' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,1.2, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='1.2' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,0.9, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='0.9' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,0.6, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='0.6' /

```

```

&DEVC XYZ=6.1,6.1,0.3, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='0.3' /

```

```

&DEVC XB=6.1,6.1,6.1,6.1,0.0,2.99, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='Altura da camada' /

```

```

&TAIL /

```

APÊNDICE E - RESUMO DAS SAÍDAS GRÁFICAS DAS SIMULAÇÕES DEFINITIVAS

Apresenta-se um resumo da saída gráfica gerada pelo *Smokeview* de cada caso simulado. A intenção é proporcionar ao leitor uma visualização do desenvolvimento do incêndio e da dispersão da fumaça, facilitando, assim, a compreensão dos gráficos apresentados capítulo 4. São apresentados, também, os gráficos de Taxa de liberação de calor, Altura da camada livre de fumaça e Gradiente vertical de temperatura.

Caso CBplus

Imagem 15 – Instante $t=0$ s.

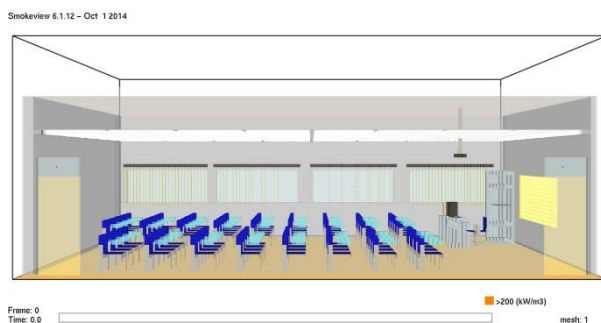


Imagem 16 – Instante $t=15$ s.

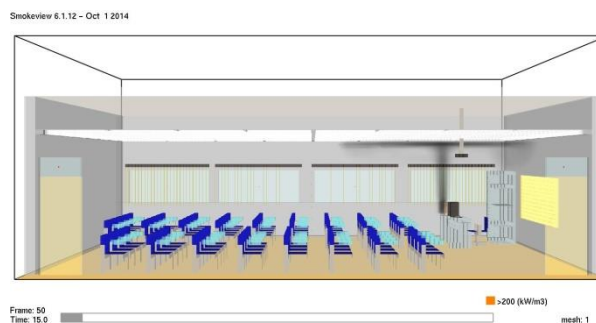


Imagem 17 – Instante $t=30$ s.

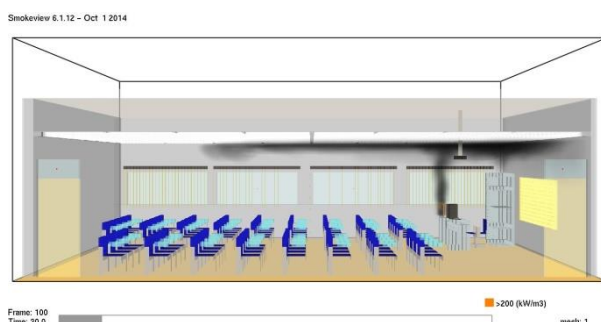


Imagem 18 – Instante $t=60$ s.

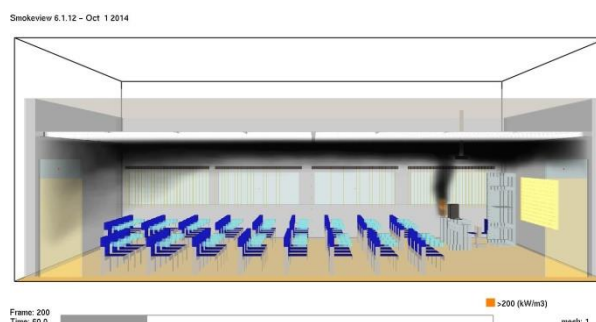


Imagem 19 – Instante $t=120$ s.

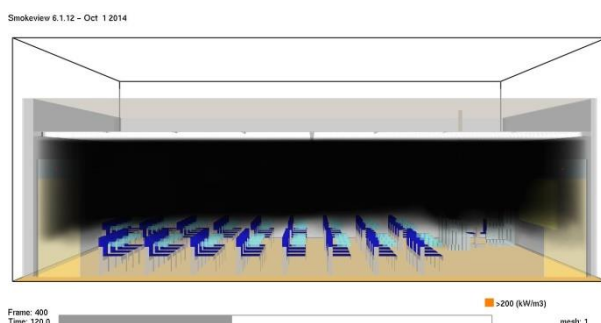


Imagem 20 – Instante $t=180$ s.



Imagem 21 – Instante $t=240$ s.

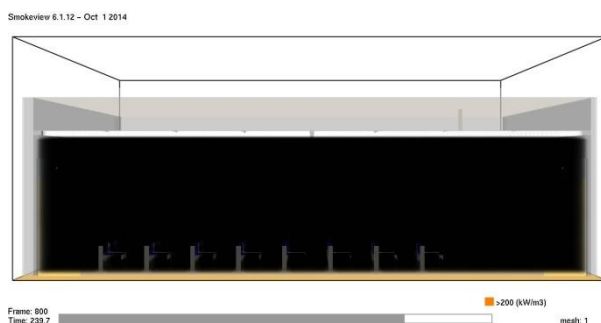


Imagem 22 – Instante $t=300$ s.

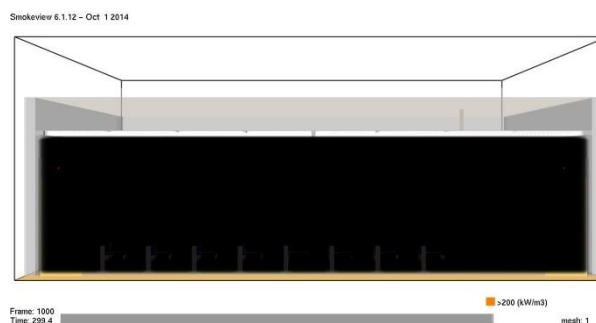


Gráfico 1 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

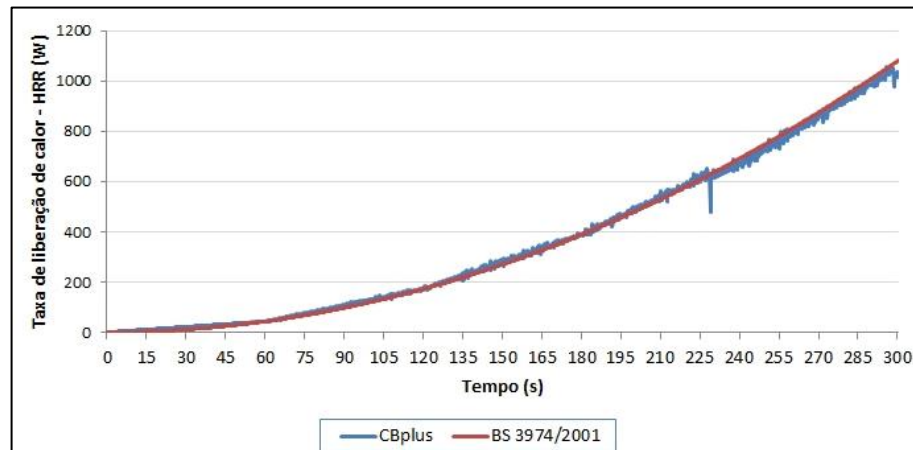


Gráfico 2 – Altura da camada livre de fumaça.

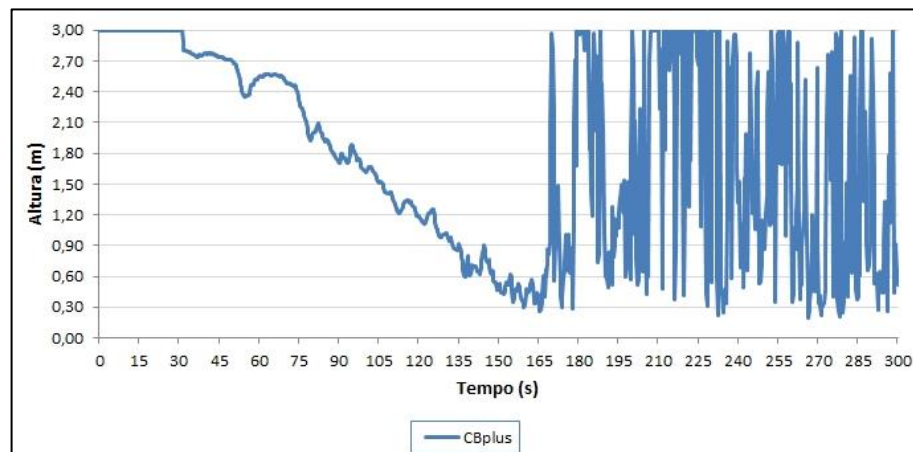
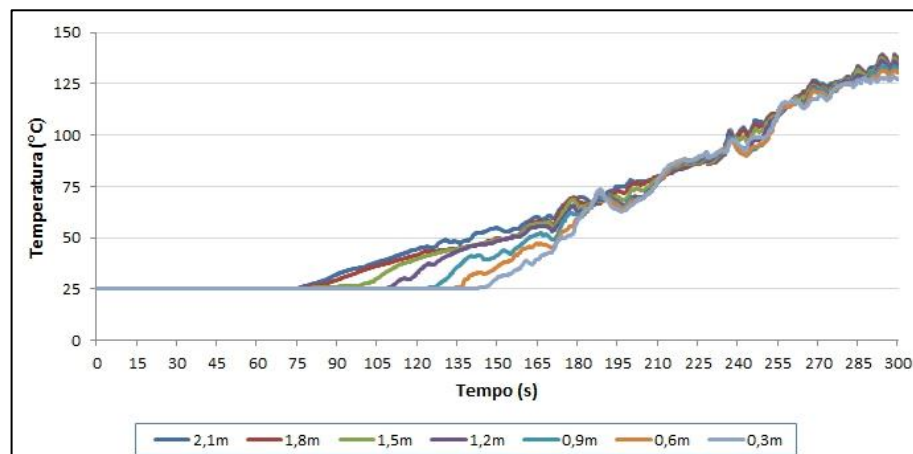


Gráfico 3 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso CBplus_open

Imagem 23 – Instante t= 0s.

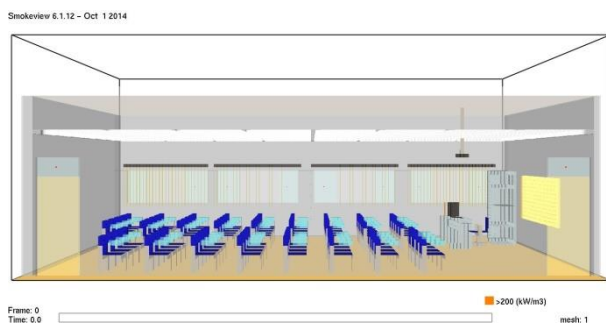


Imagem 24 – Instante t= 15s.

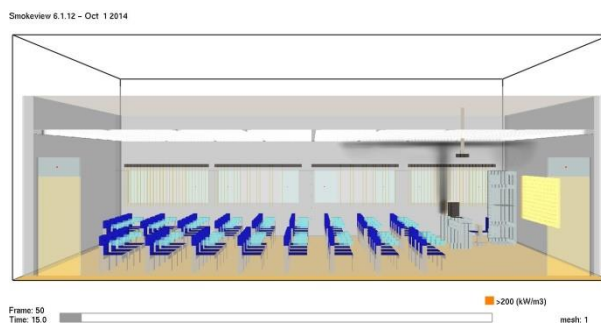


Imagem 25 – Instante t= 30s.

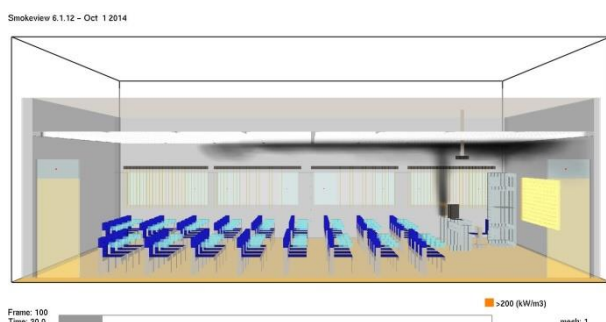


Imagem 26 – Instante t= 60s.



Imagem 27 – Instante t= 120s.

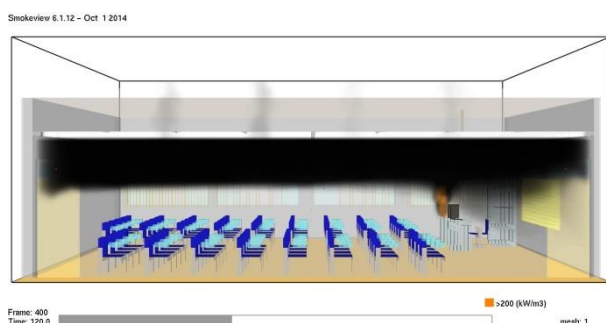


Imagem 28 – Instante t= 180s.

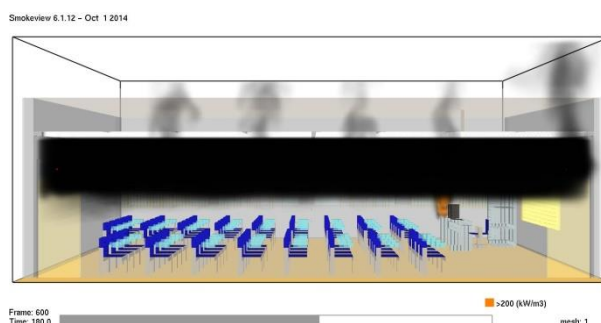


Imagem 29 – Instante t= 240s.

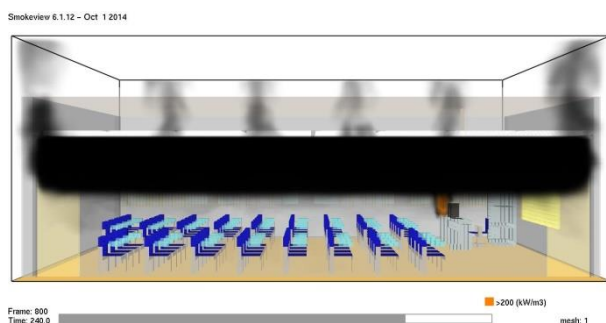


Imagem 30 – Instante t= 300s.

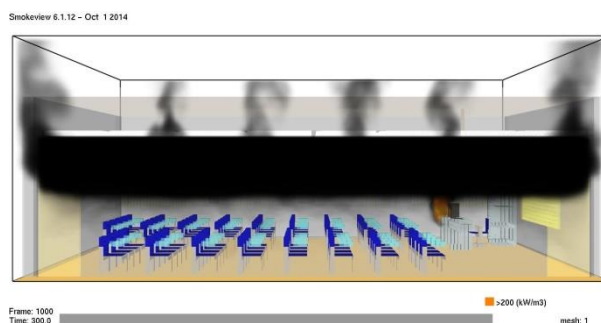


Gráfico 4 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

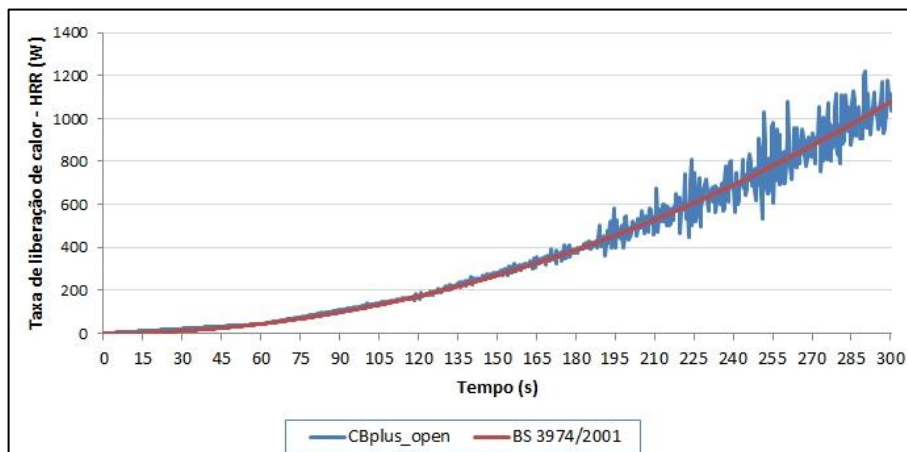


Gráfico 5 – Altura da camada livre de fumaça.

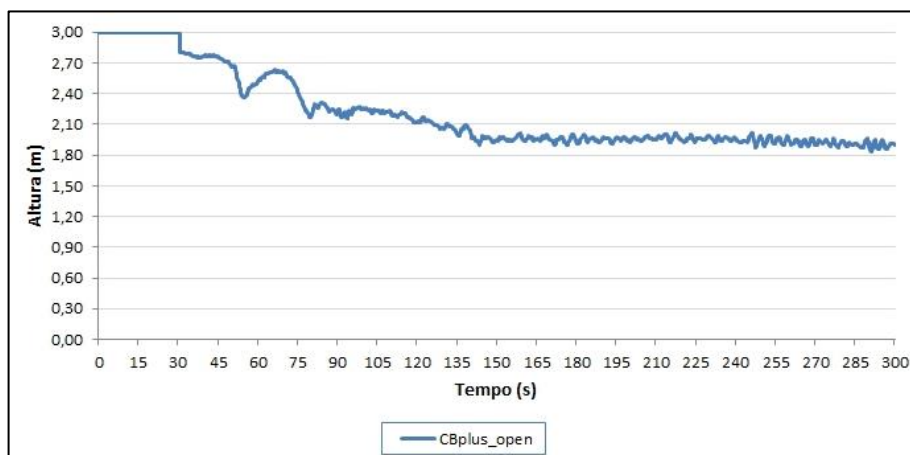
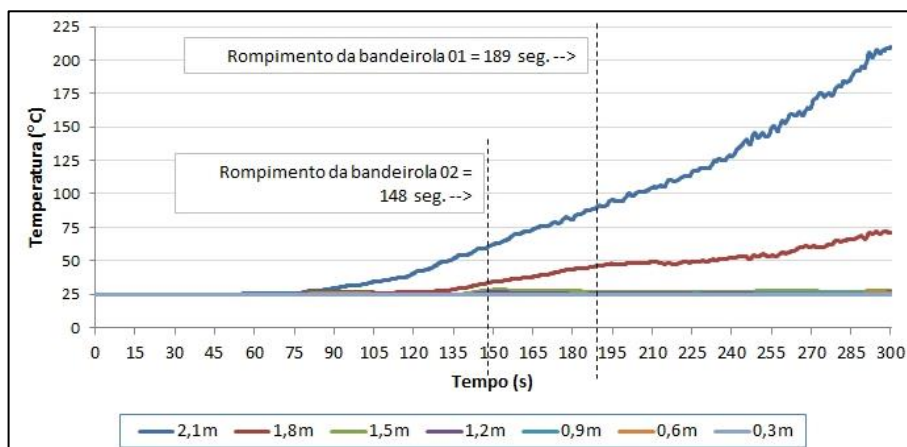


Gráfico 6 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso DIVplus

Imagem 31 – Instante $t=0$ s.



Imagem 32 – Instante $t=15$ s.



Imagem 33 – Instante $t=30$ s.



Imagem 34 – Instante $t=60$ s.



Imagem 35 – Instante $t=120$ s.

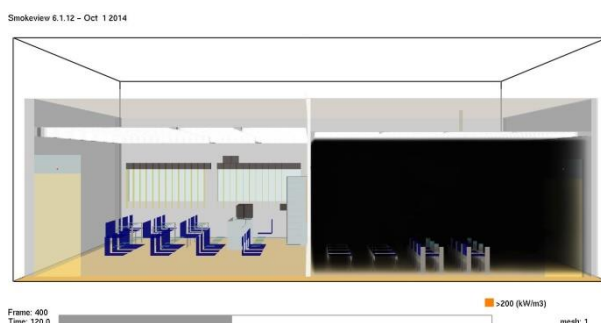


Imagem 36 – Instante $t=180$ s.



Imagem 37 – Instante $t=240$ s.

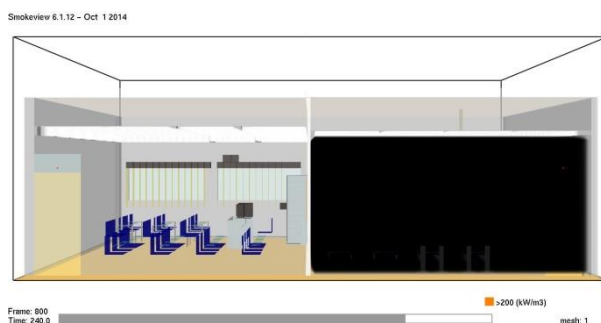


Imagem 38 – Instante $t=300$ s.

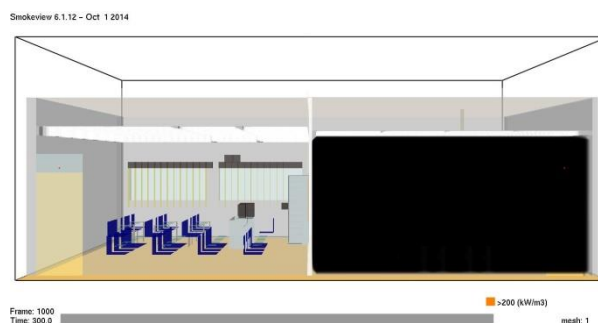


Gráfico 7 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

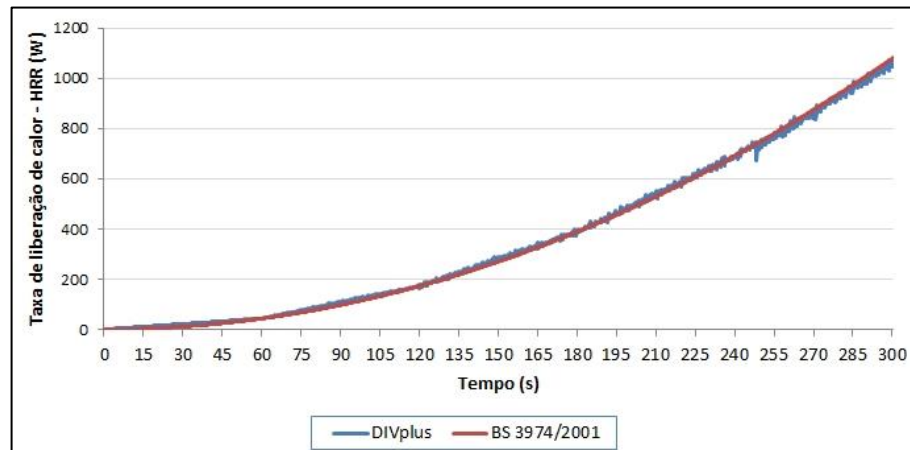


Gráfico 8 – Altura da camada livre de fumaça.

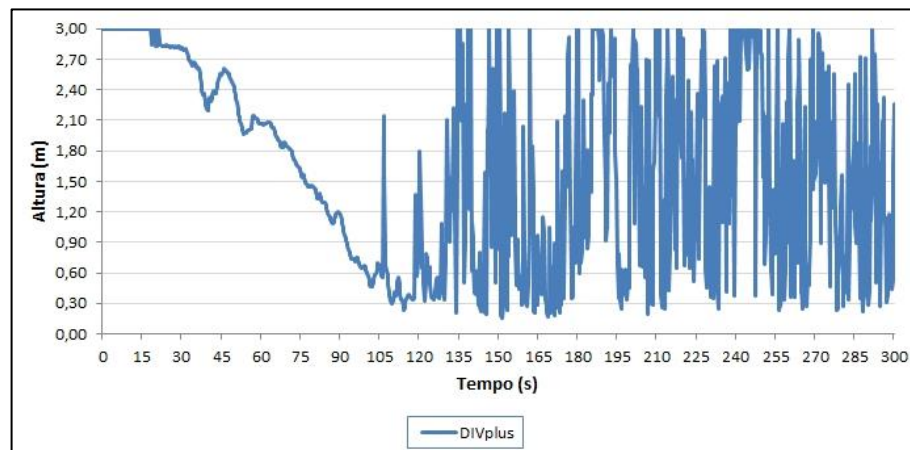
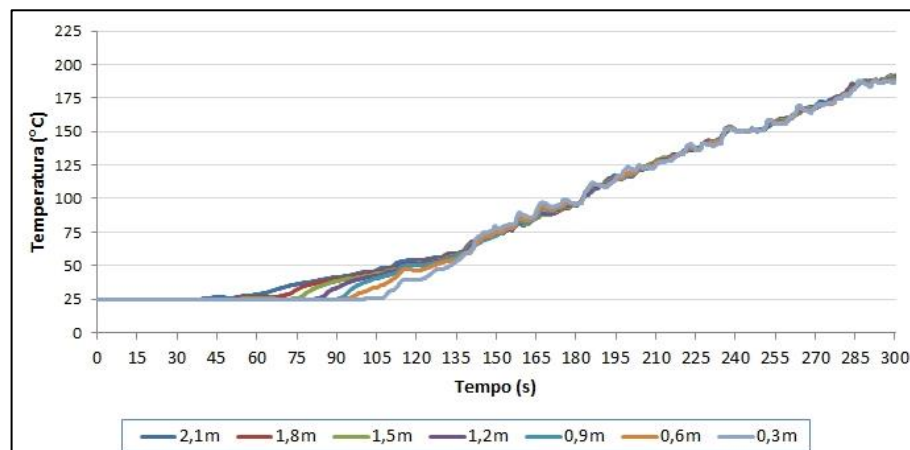


Gráfico 9 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso DIVplus open

Imagem 39 – Instante $t = 0s$.



Imagem 40 – Instante $t = 15s$.



Imagem 41 – Instante $t = 30s$.



Imagem 42 – Instante $t = 60s$.



Imagem 43 – Instante $t = 120s$.



Imagem 44 – Instante $t = 180s$.



Imagem 45 – Instante $t = 240s$.



Imagem 46 – Instante $t = 300s$.



Gráfico 10 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

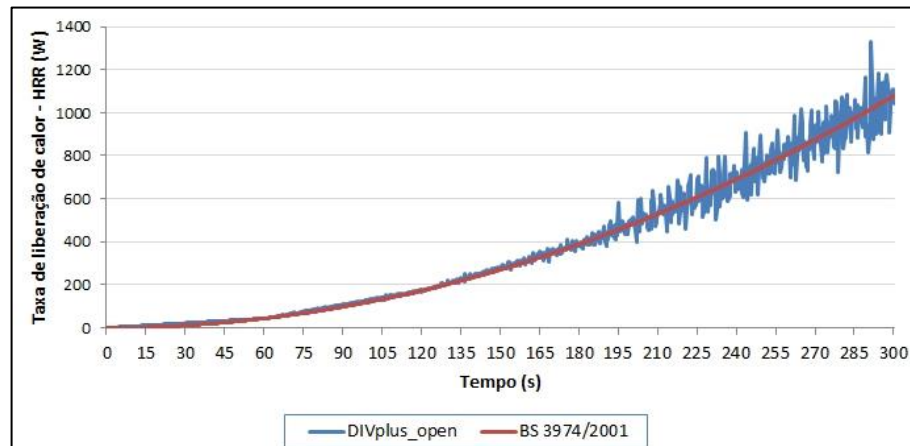


Gráfico 11 – Altura da camada livre de fumaça.

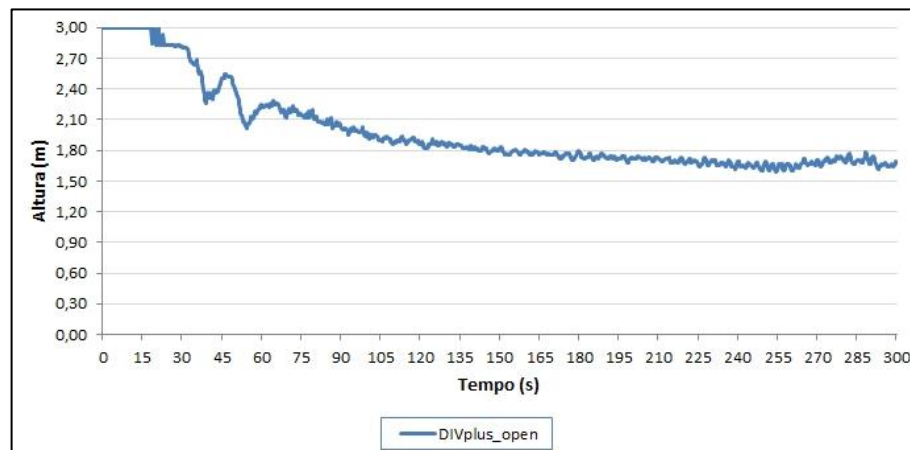
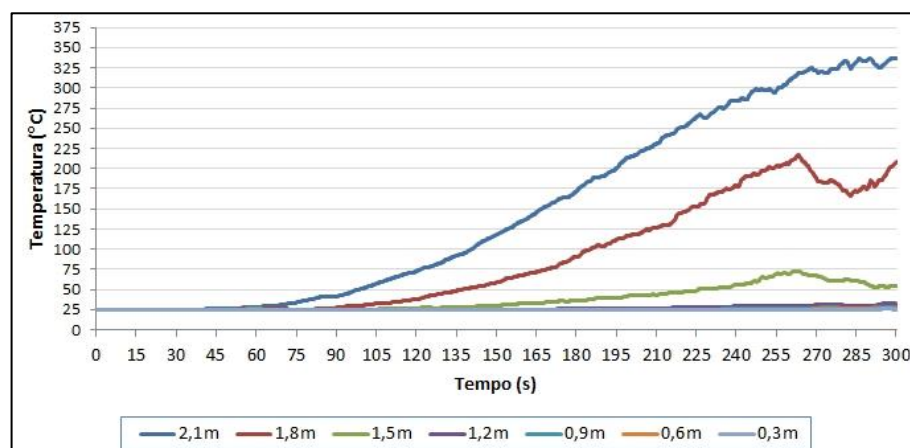


Gráfico 12 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-25plus

Imagem 47 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 48 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 49 – Instante $t = 30$ s.

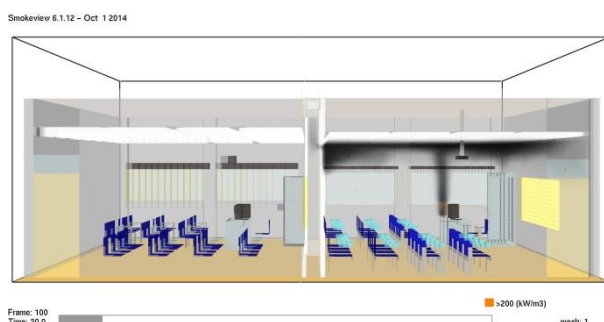


Imagem 50 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 51 – Instante $t = 120$ s.



Imagem 52 – Instante $t = 180$ s.

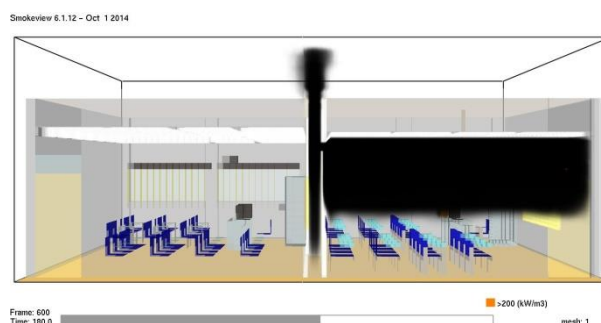


Imagem 53 – Instante $t = 240$ s.

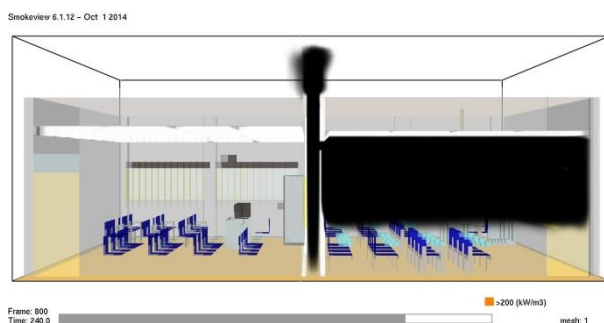


Imagem 54 – Instante $t = 300$ s.



Gráfico 13 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

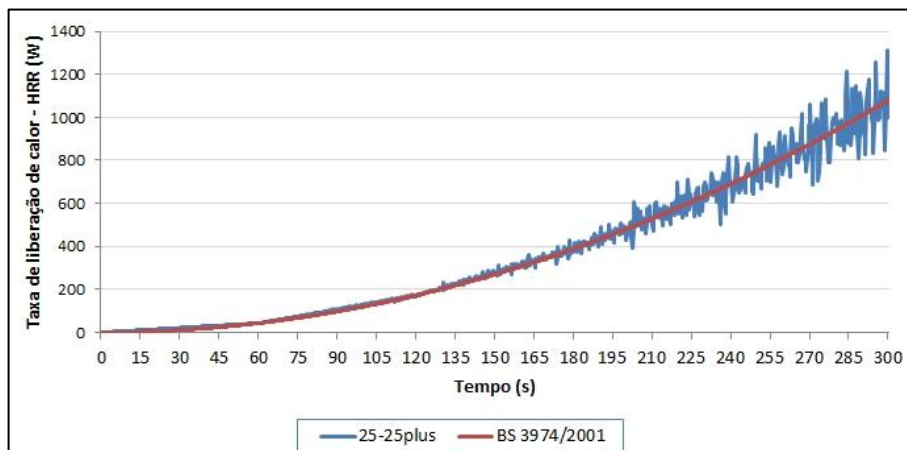


Gráfico 14 – Altura da camada livre de fumaça.

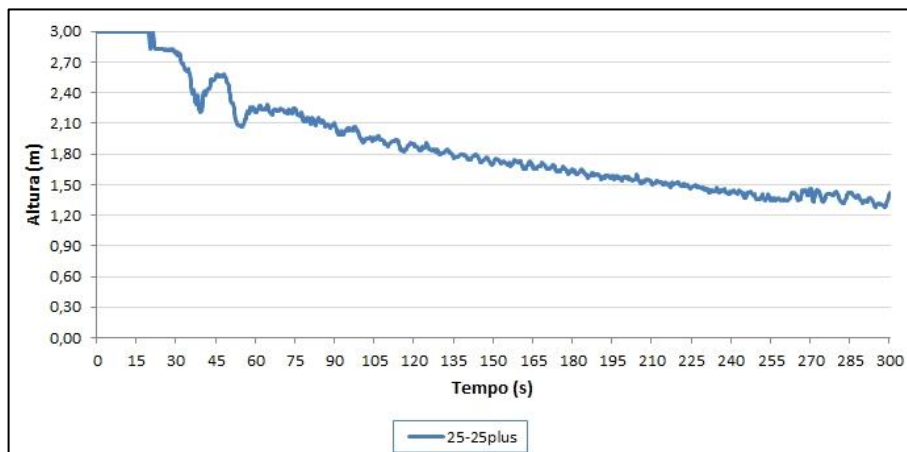
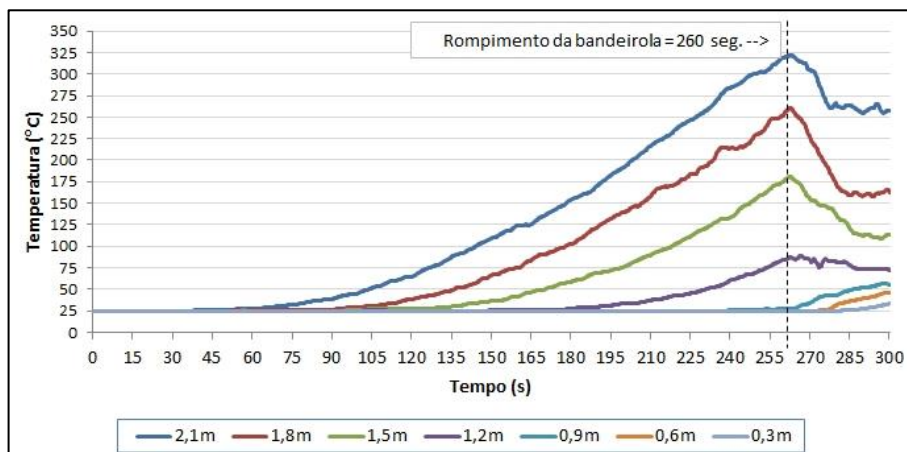


Gráfico 15 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-25plus_open

Imagem 55 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 56 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 57 – Instante $t = 30$ s.

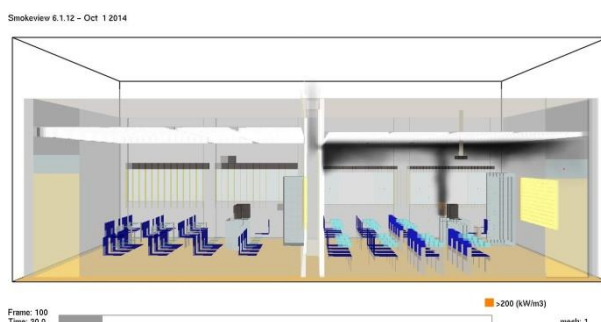


Imagem 58 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 59 – Instante $t = 120$ s.

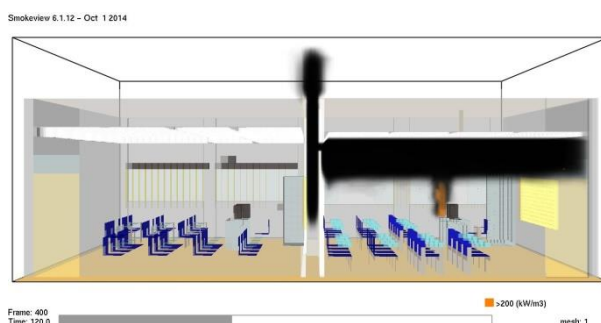


Imagem 60 – Instante $t = 180$ s.



Imagem 61 – Instante $t = 240$ s.



Imagem 62 – Instante $t = 300$ s.



Gráfico 16 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

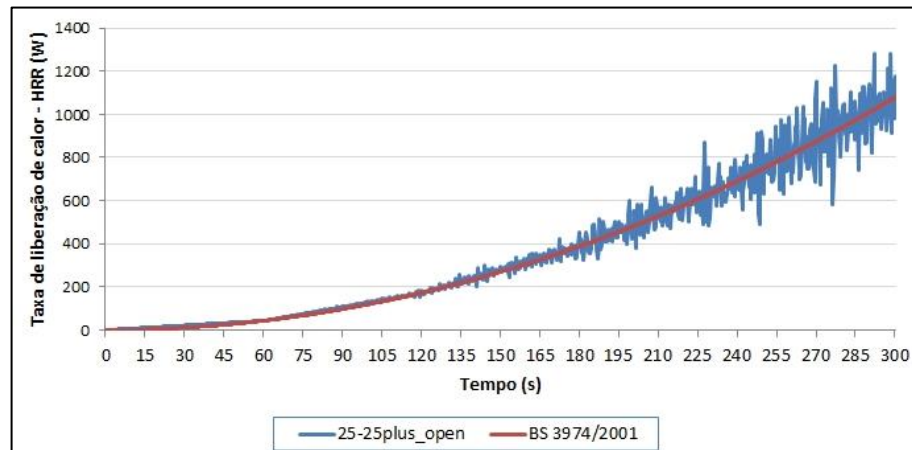


Gráfico 17 – Altura da camada livre de fumaça.

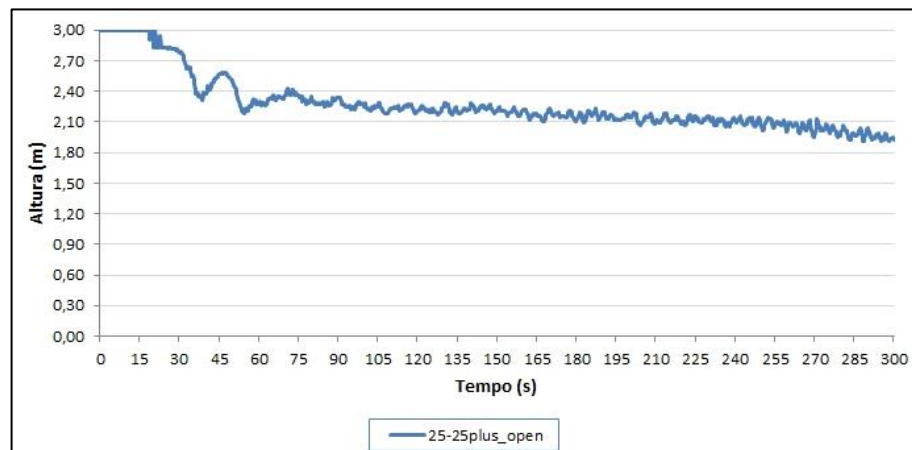
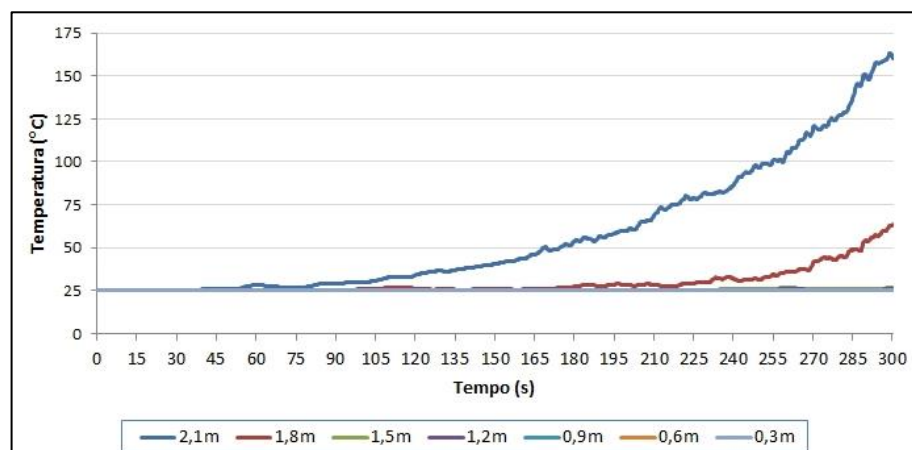


Gráfico 18 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-50plus

Imagem 63 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 64 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 65 – Instante $t = 30$ s.

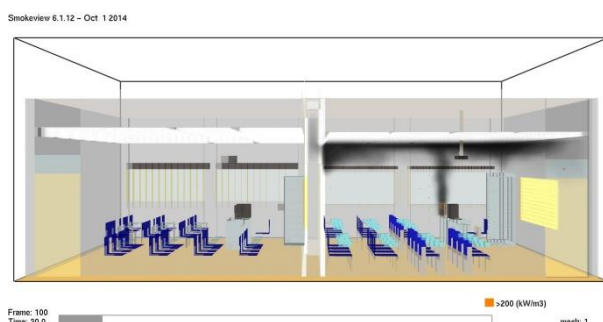


Imagem 66 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 67 – Instante $t = 120$ s.

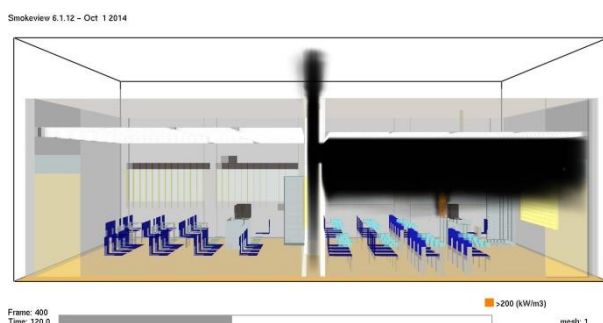


Imagem 68 – Instante $t = 180$ s.

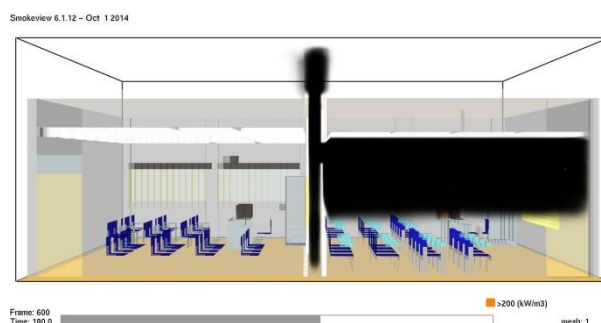


Imagem 69 – Instante $t = 240$ s.

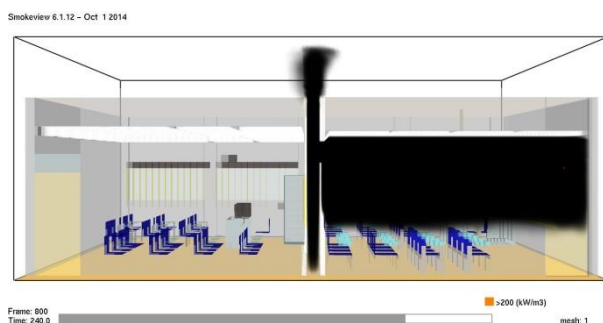


Imagem 70 – Instante $t = 300$ s.

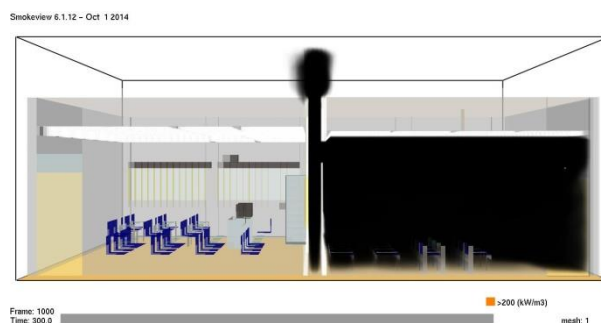


Gráfico 19 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

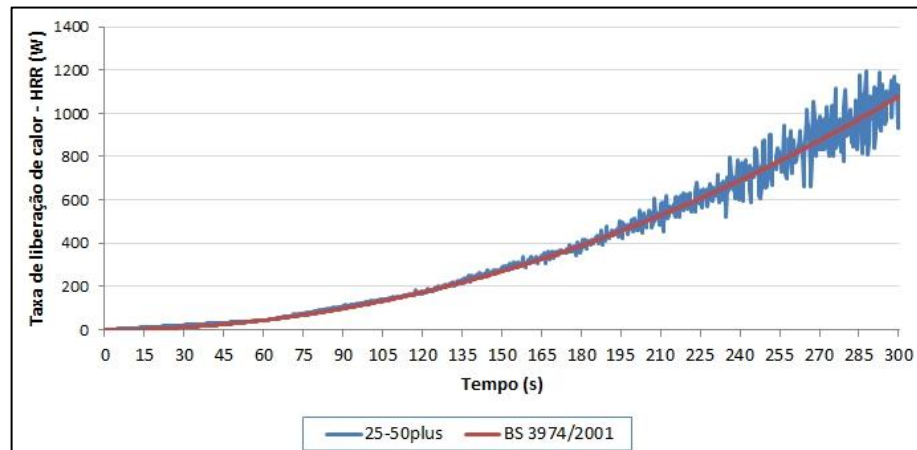


Gráfico 20 – Altura da camada livre de fumaça.

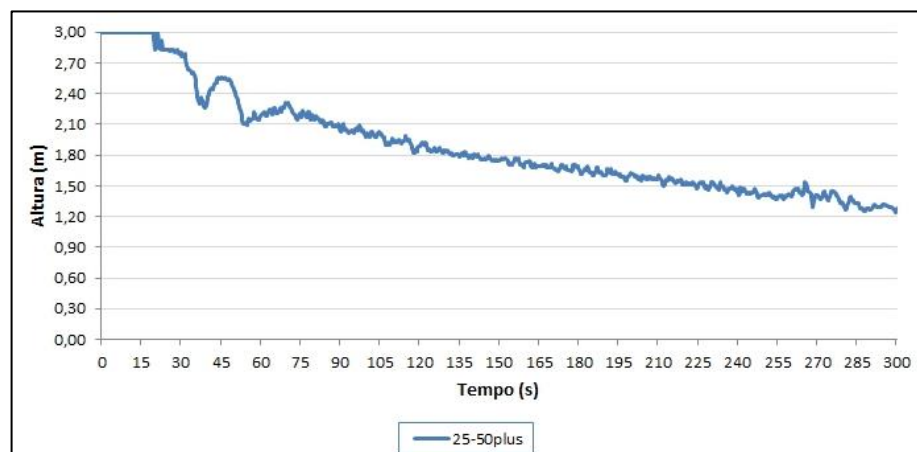
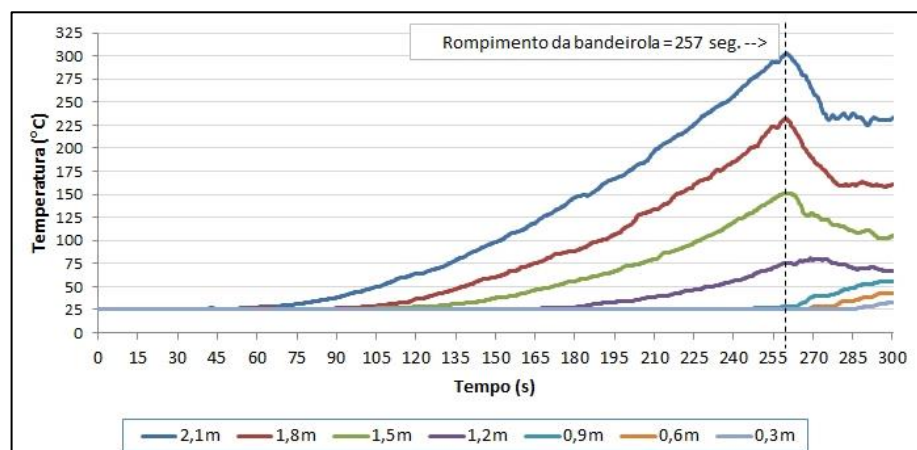


Gráfico 21 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-50plus_open

Imagem 71 – Instante $t = 0s$.



Imagem 72 – Instante $t = 15s$.



Imagem 73 – Instante $t = 30s$.



Imagem 74 – Instante $t = 60s$.



Imagem 75 – Instante $t = 120s$.

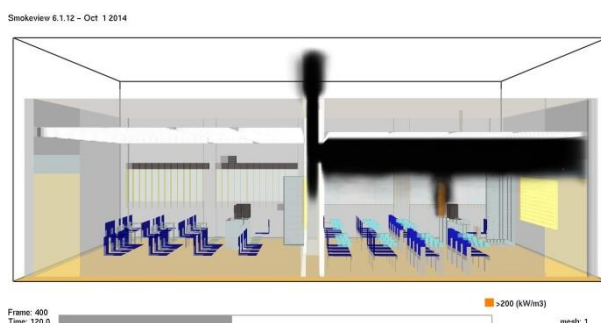


Imagem 76 – Instante $t = 180s$.

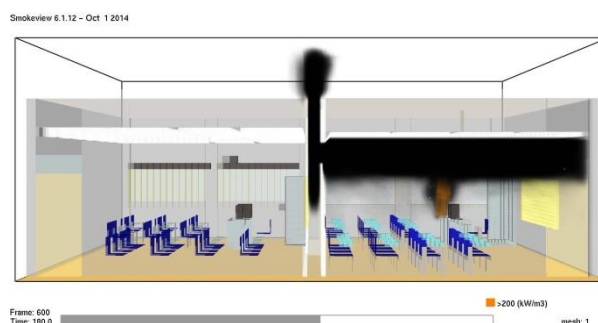


Imagem 77 – Instante $t = 240s$.



Imagem 78 – Instante $t = 300s$.

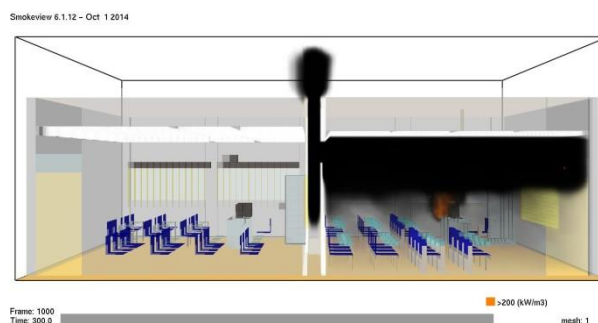


Gráfico 22 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

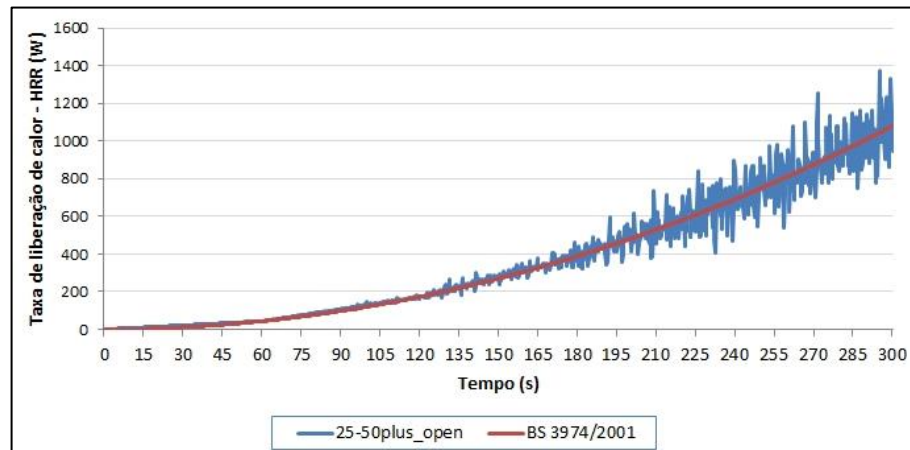


Gráfico 23 – Altura da camada livre de fumaça.

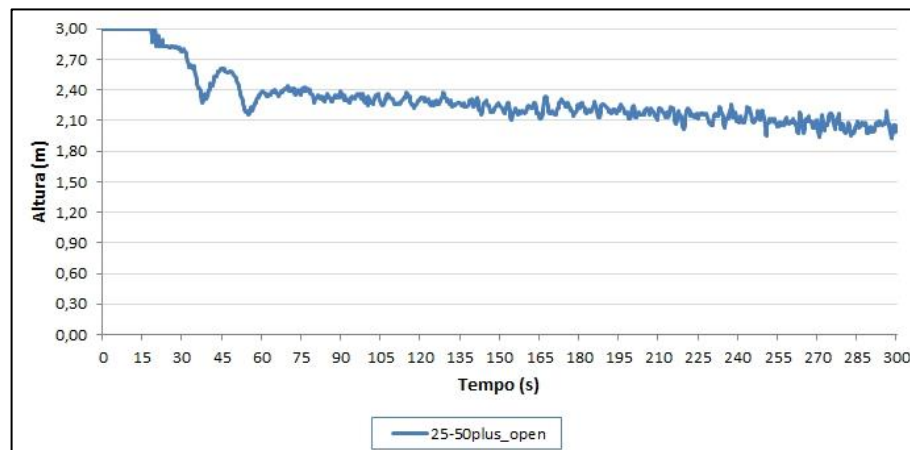
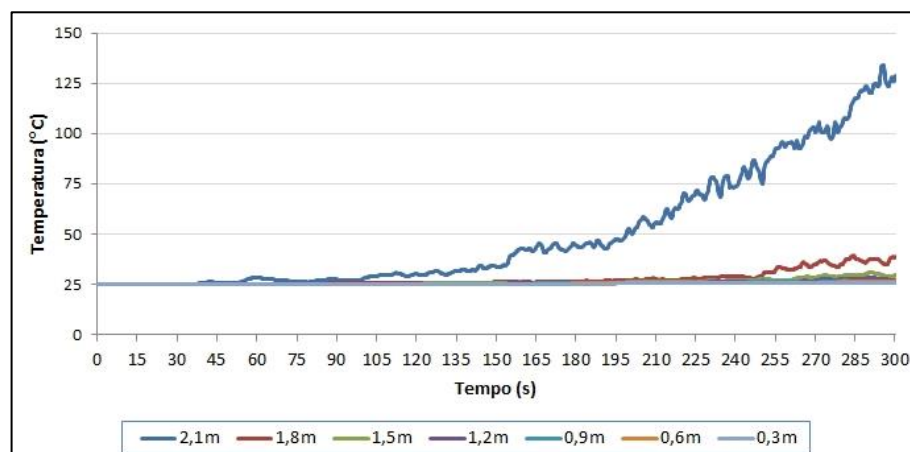


Gráfico 24 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-75plus

Imagem 79 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 80 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 81 – Instante $t = 30$ s.

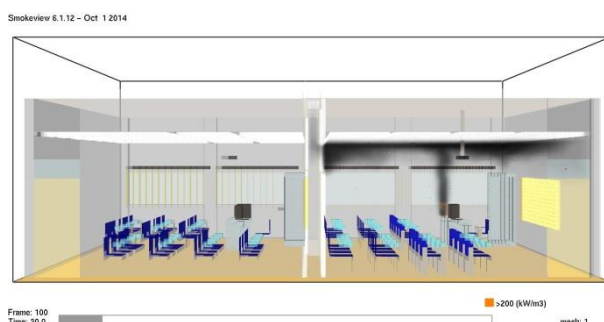


Imagem 82 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 83 – Instante $t = 120$ s.

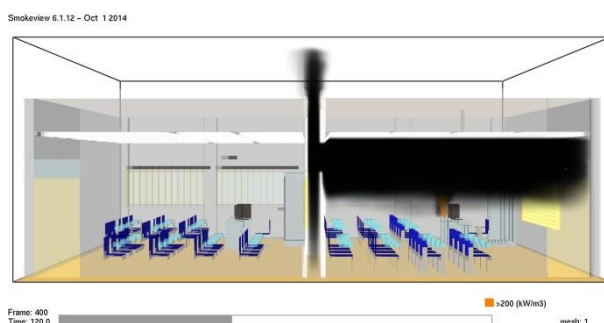


Imagem 84 – Instante $t = 180$ s.

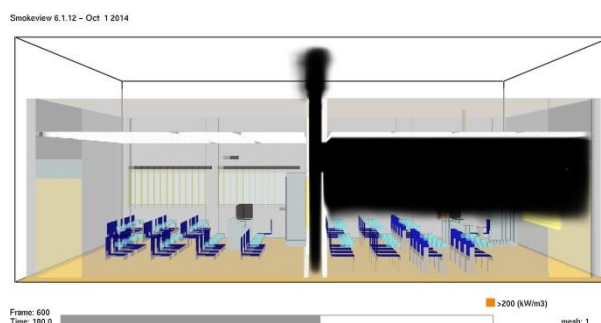


Imagem 85 – Instante $t = 240$ s.

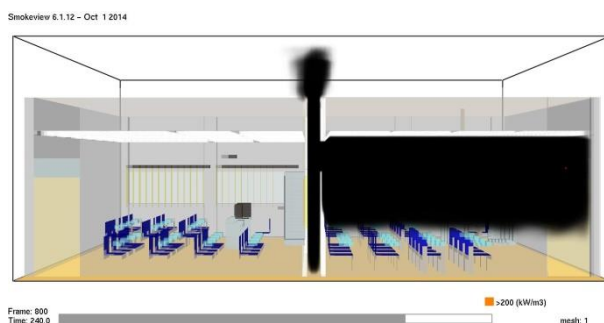


Imagem 86 – Instante $t = 300$ s.

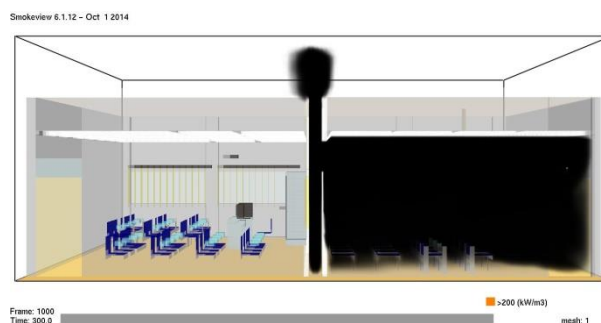


Gráfico 25 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

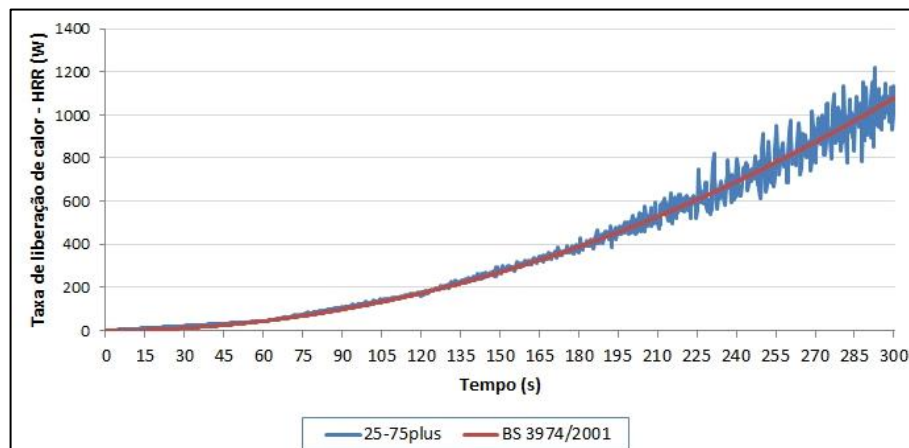


Gráfico 26 – Altura da camada livre de fumaça.

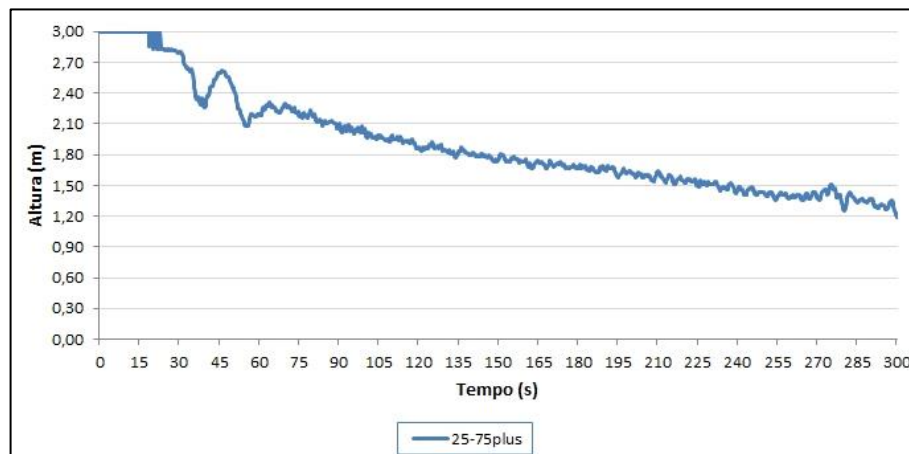
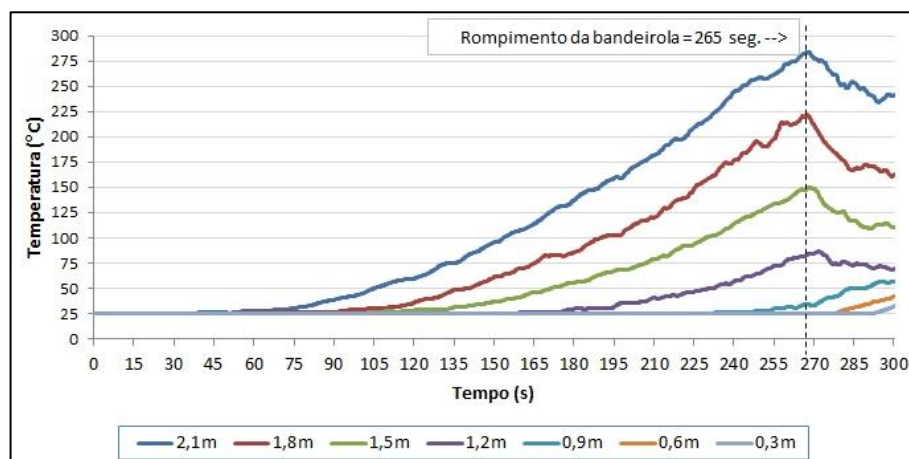


Gráfico 27 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-75plus_open

Imagem 87 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 88 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 89 – Instante $t = 30$ s.

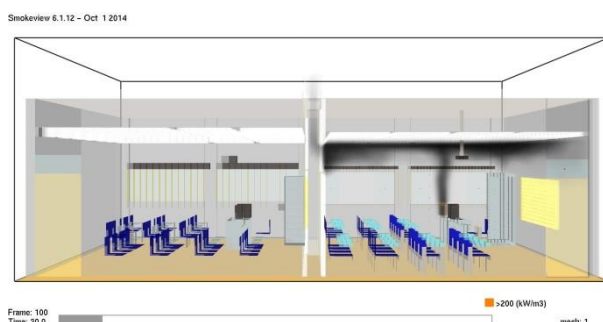


Imagem 90 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 91 – Instante $t = 120$ s.

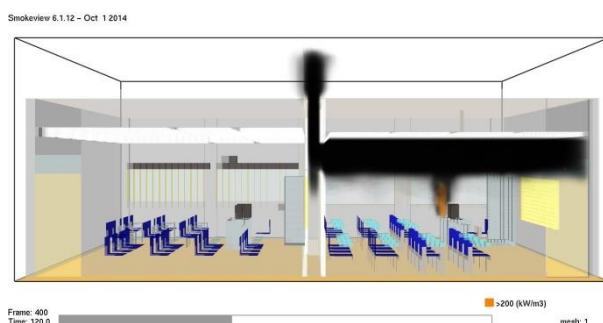


Imagem 92 – Instante $t = 180$ s.

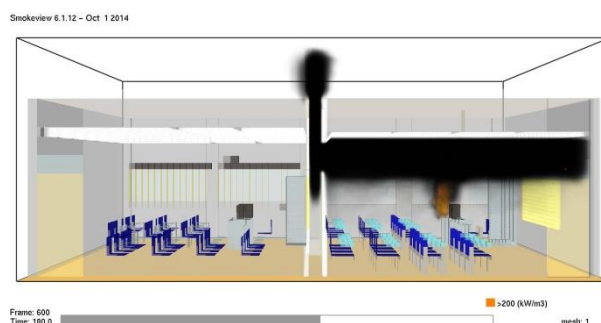


Imagem 93 – Instante $t = 240$ s.

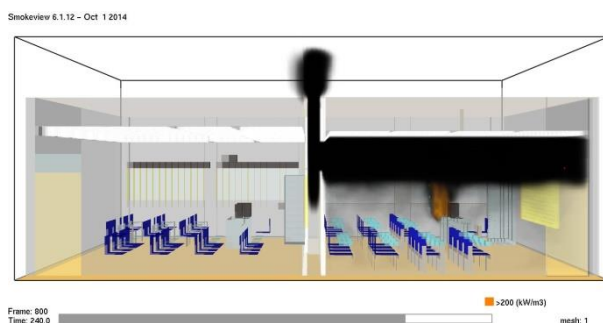


Imagem 94 – Instante $t = 300$ s.



Gráfico 28 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

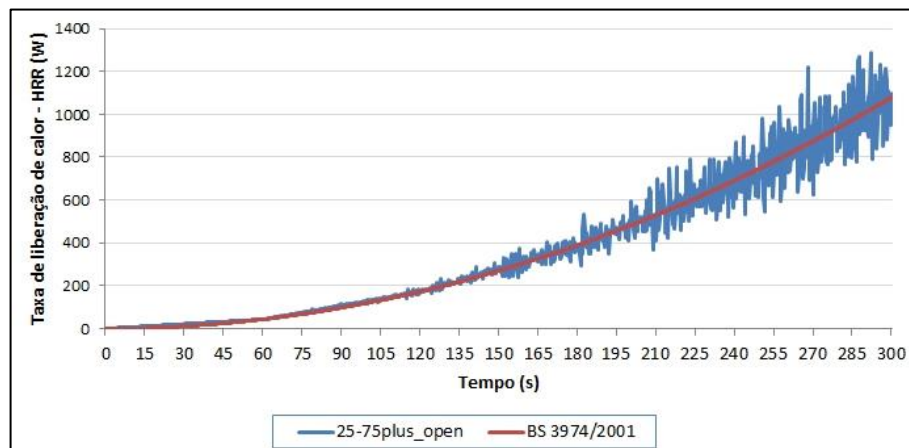


Gráfico 29 – Altura da camada livre de fumaça.

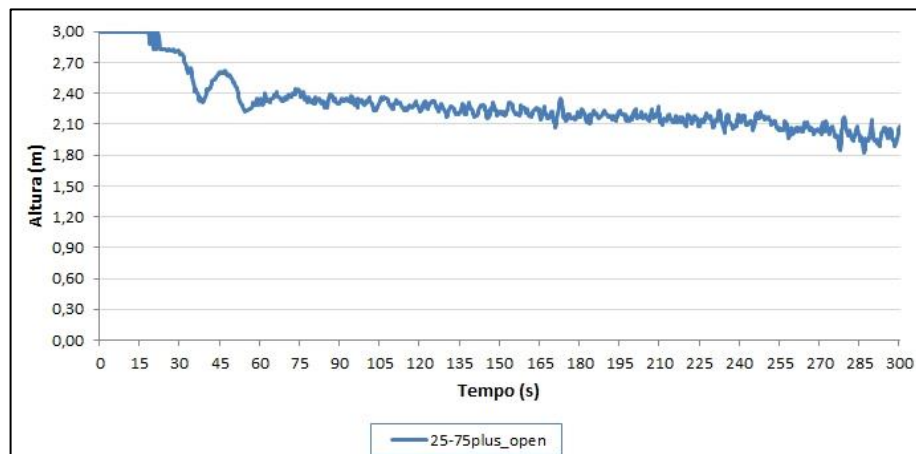
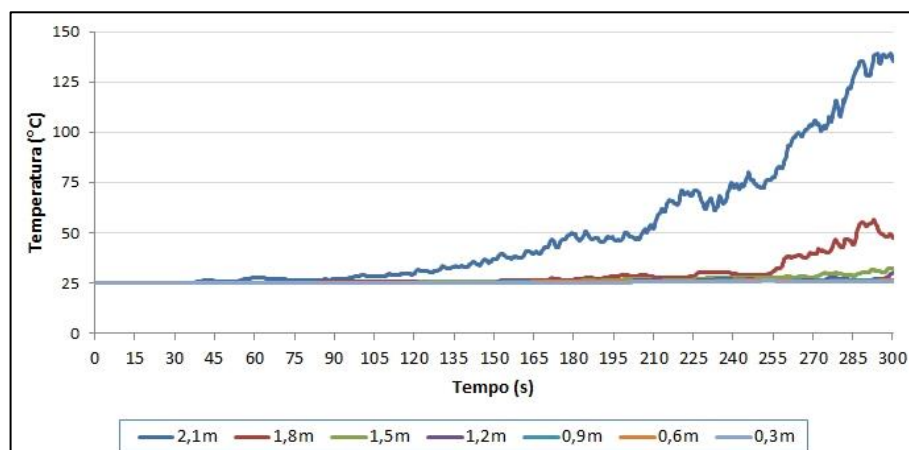


Gráfico 30 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-100plus

Imagem 95 – Instante $t=0s$.



Imagem 96 – Instante $t=15s$.

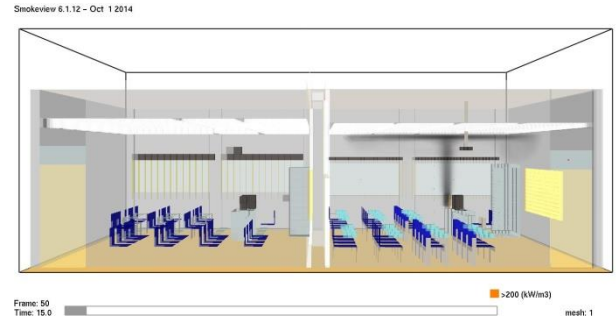


Imagem 97 – Instante $t=30s$.



Imagem 98 – Instante $t=60s$.



Imagem 99 – Instante $t=120s$.



Imagem 100 – Instante $t=180s$.

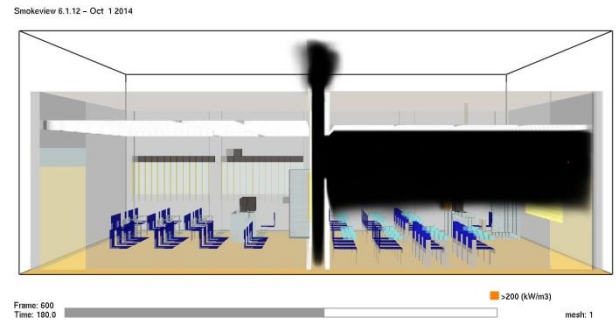


Imagem 101 – Instante $t=240s$.

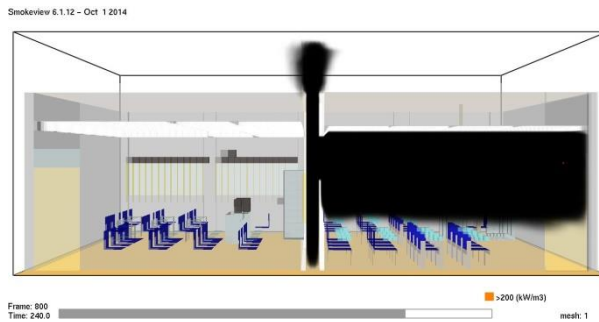


Imagem 102 – Instante $t=300s$.

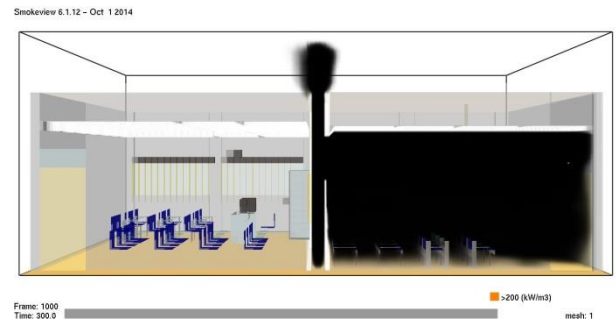


Gráfico 31 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

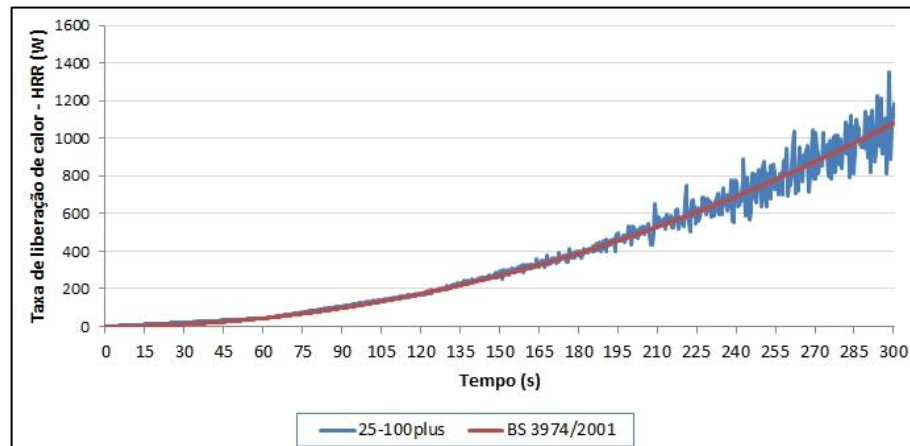


Gráfico 32 – Altura da camada livre de fumaça.

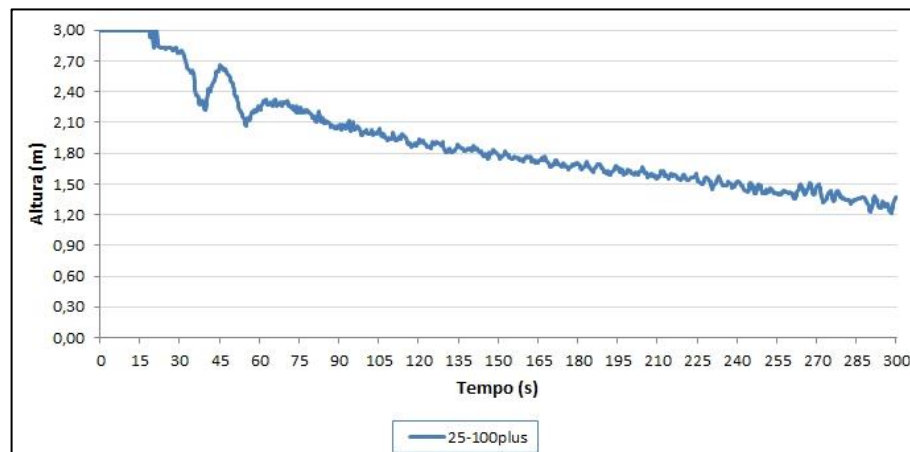
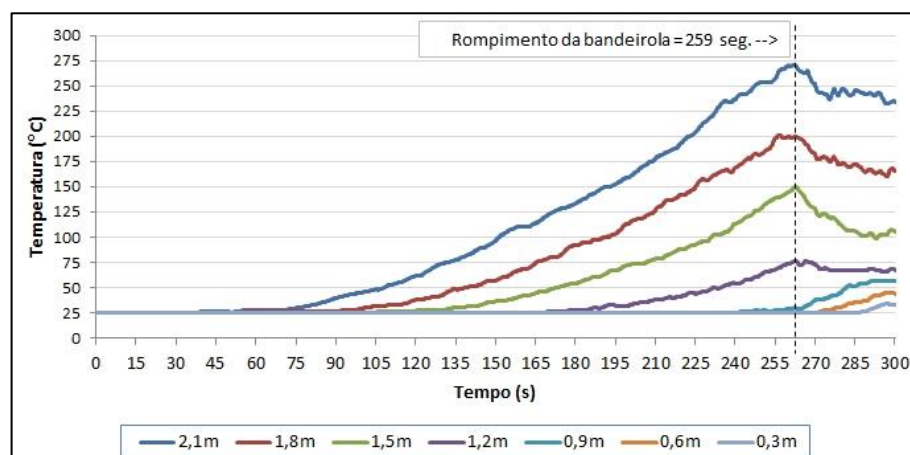


Gráfico 33 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 25-100plus open

Imagem 103 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 104 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 105 – Instante $t = 30$ s.

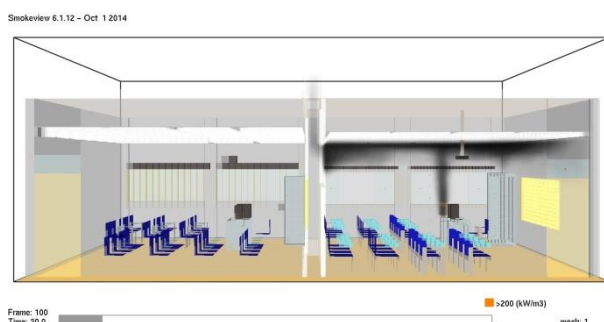


Imagem 106 – Instante $t = 60$ s.

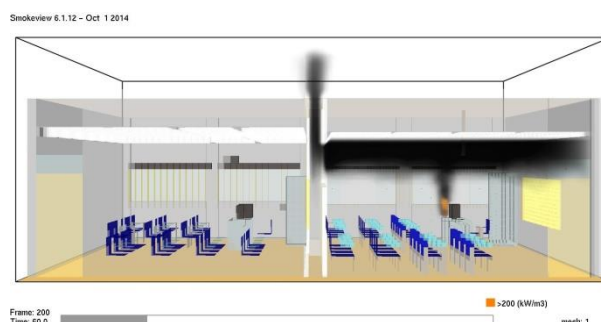


Imagem 107 – Instante $t = 120$ s.

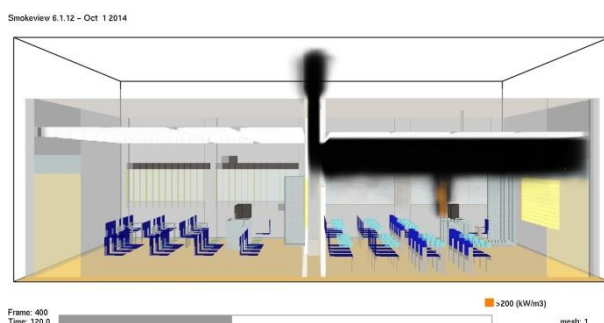


Imagem 108 – Instante $t = 180$ s.

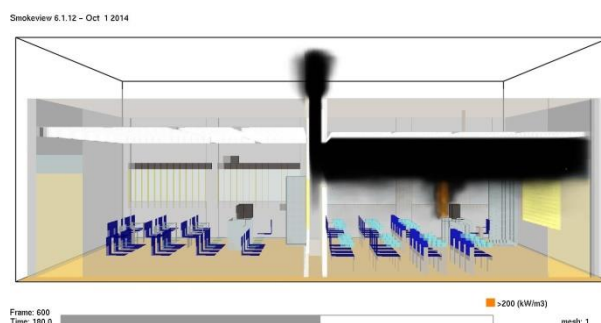


Imagem 109 – Instante $t = 240$ s.

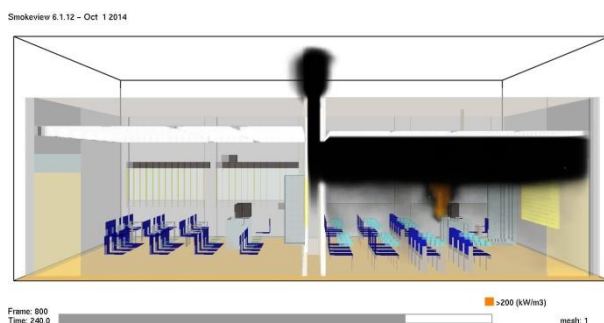


Imagem 110 – Instante $t = 300$ s.

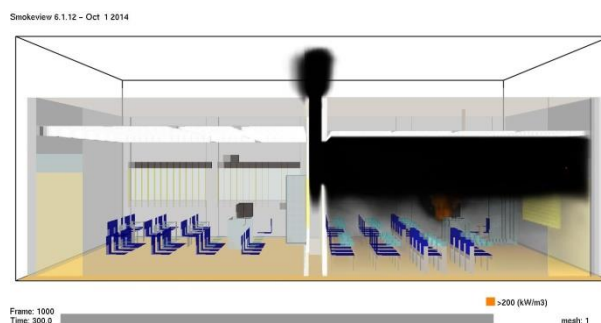


Gráfico 34 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

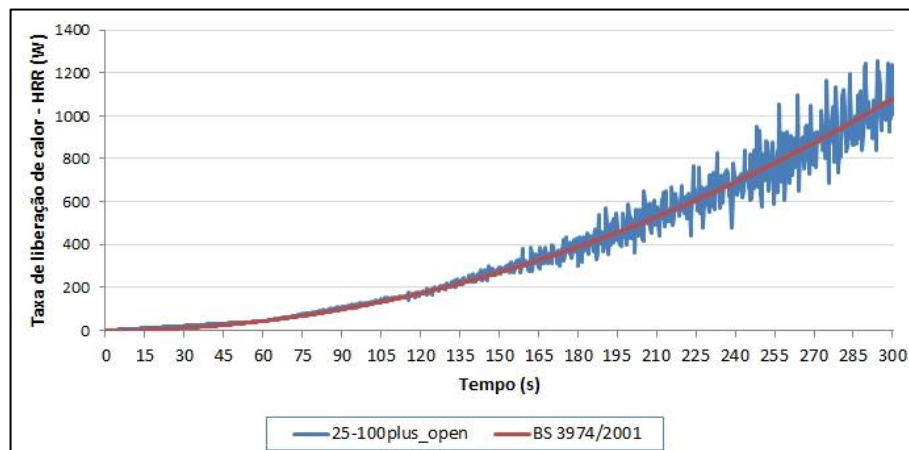


Gráfico 35 – Altura da camada livre de fumaça.

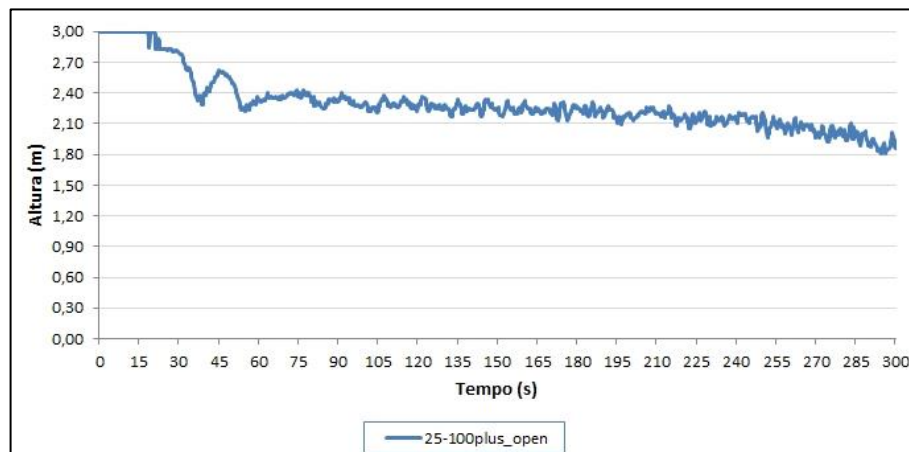
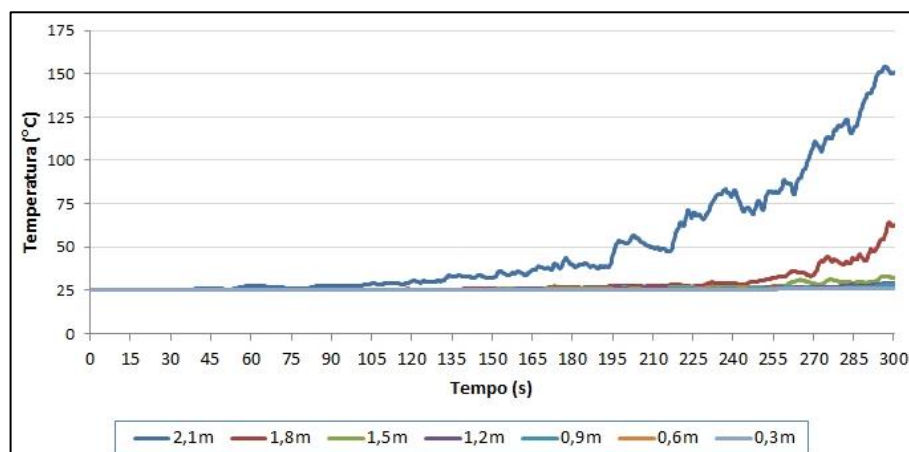


Gráfico 36 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-25plus

Imagem 111 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 112 – Instante $t = 15$ s.

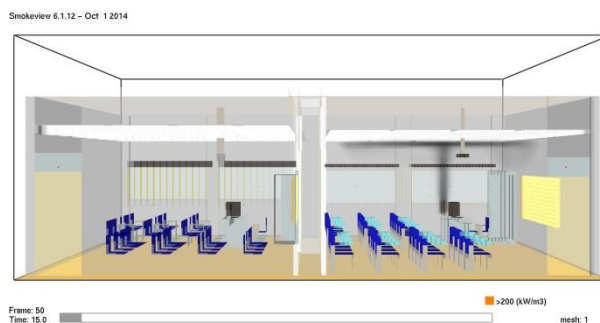


Imagem 113 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 114 – Instante $t = 60$ s.

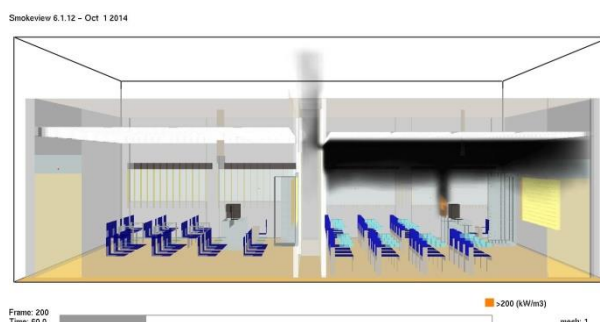


Imagem 115 – Instante $t = 120$ s.

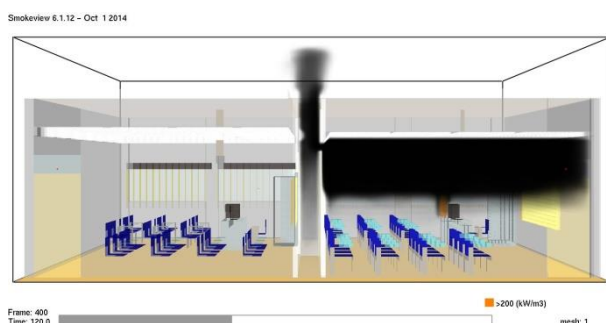


Imagem 116 – Instante $t = 180$ s.

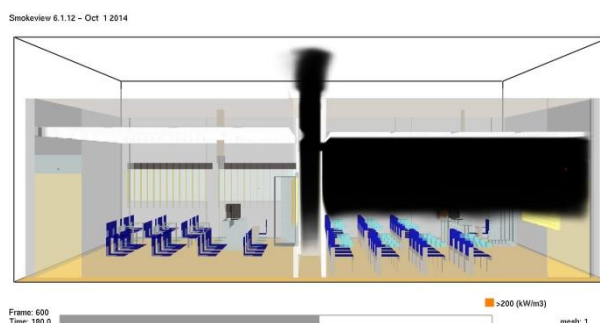


Imagem 117 – Instante $t = 240$ s.

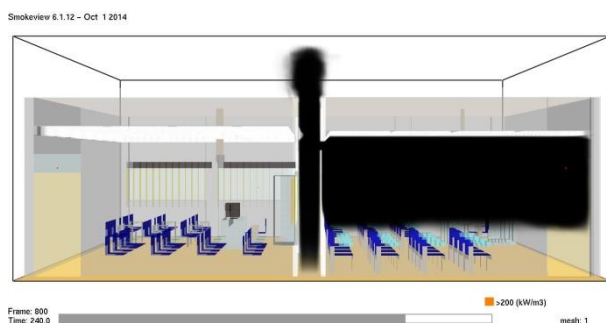


Imagem 118 – Instante $t = 300$ s.

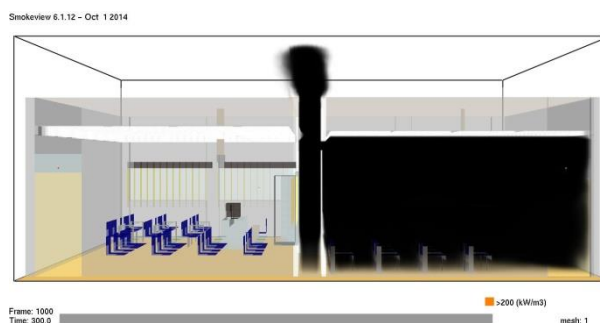


Gráfico 37 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normatizada e simulada.

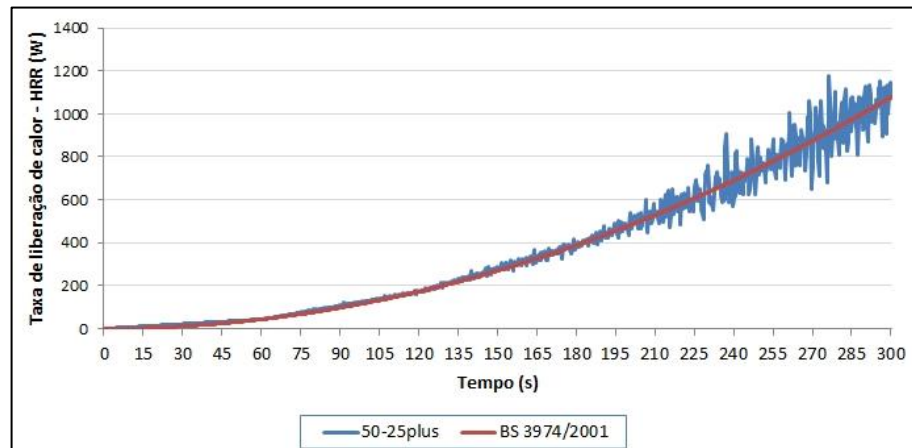


Gráfico 38 – Altura da camada livre de fumaça.

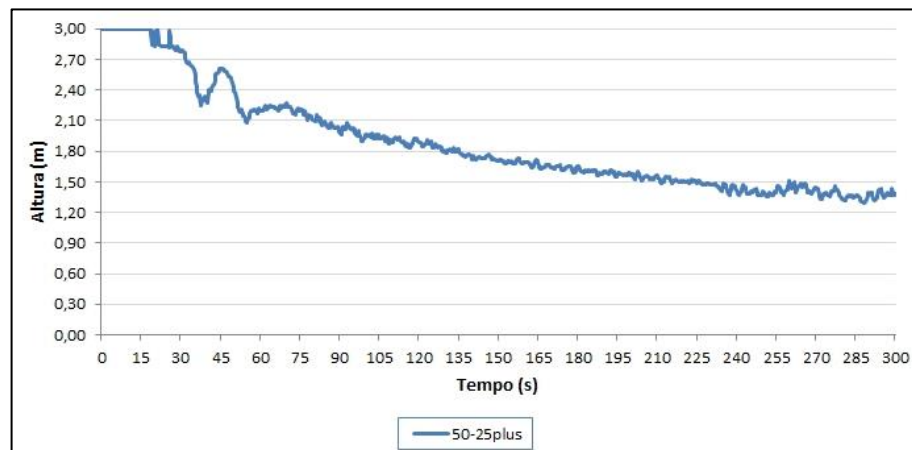
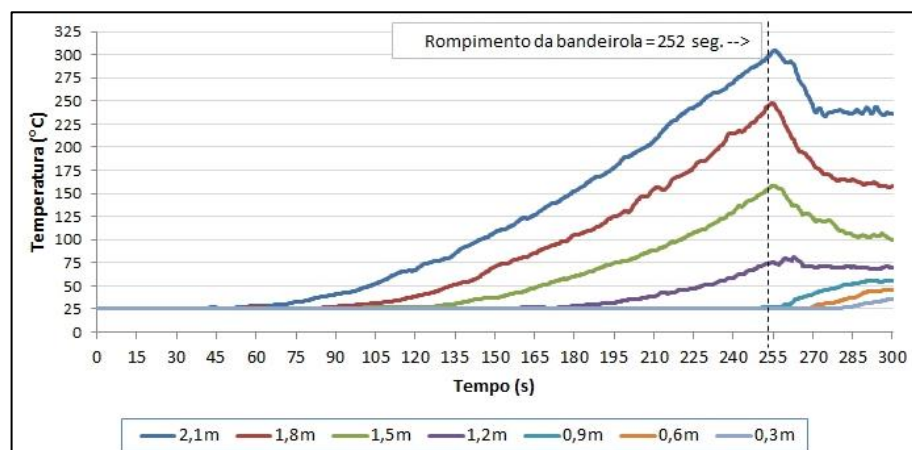


Gráfico 39 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-25plus_open

Imagem 119 – Instante $t = 0s$.



Imagem 120 – Instante $t = 15s$.

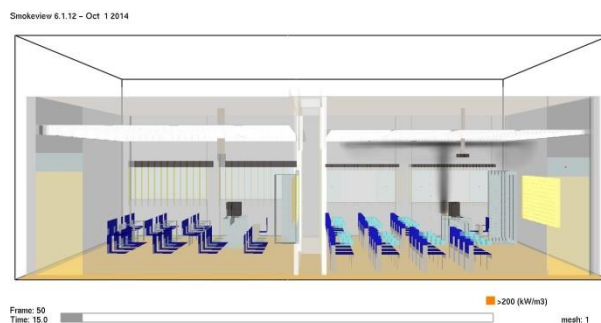


Imagem 121 – Instante $t = 30s$.

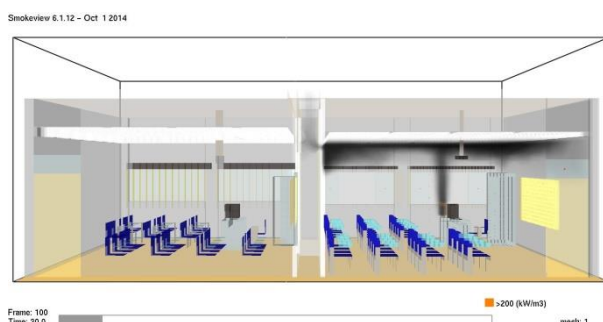


Imagem 122 – Instante $t = 60s$.

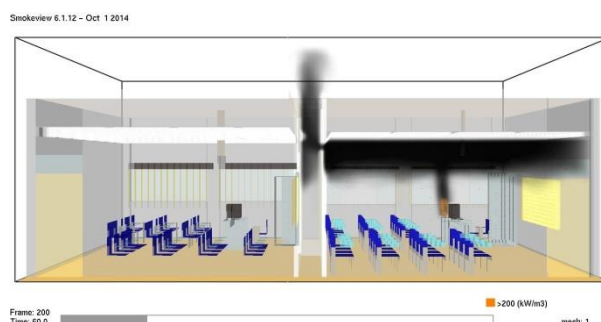


Imagem 123 – Instante $t = 120s$.

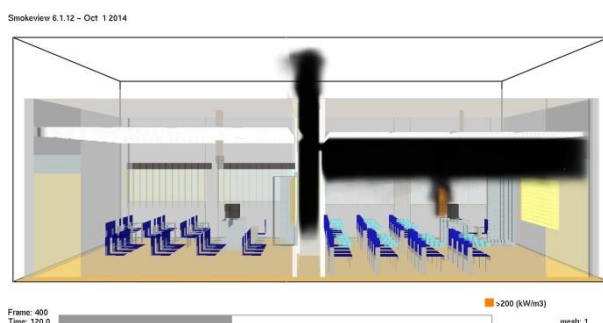


Imagem 124 – Instante $t = 180s$.

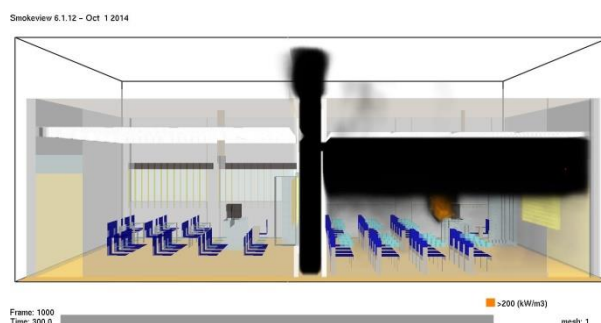


Imagem 125 – Instante $t = 240s$.

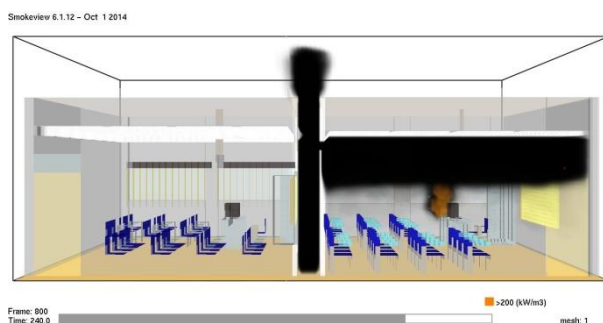


Imagem 126 – Instante $t = 300s$.

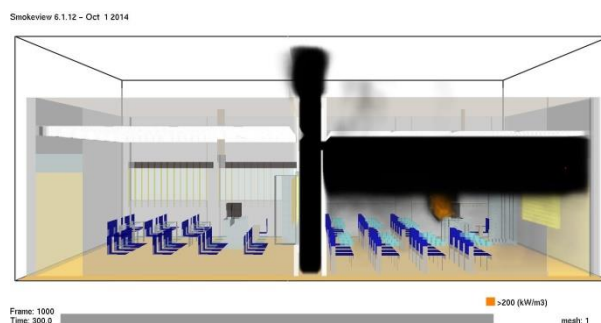


Gráfico 40 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

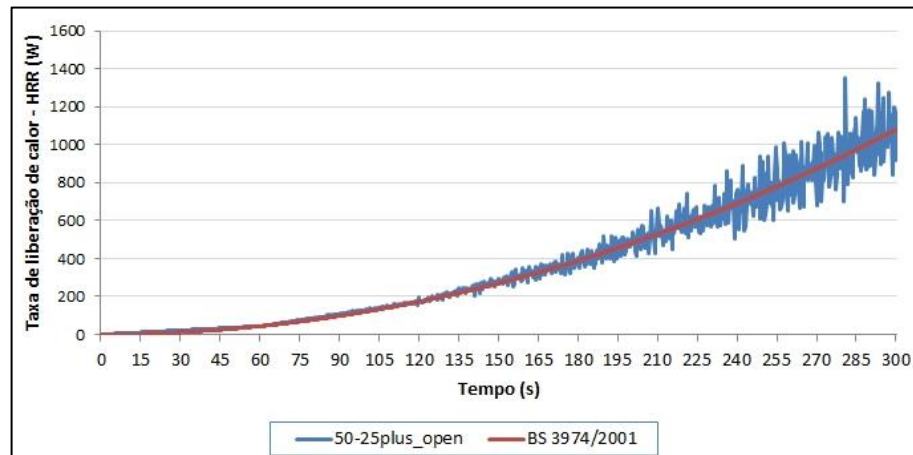


Gráfico 41 – Altura da camada livre de fumaça.

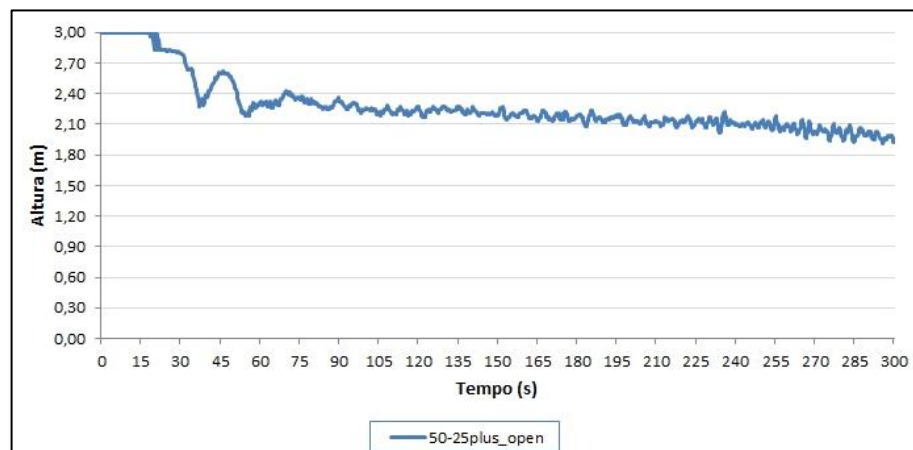
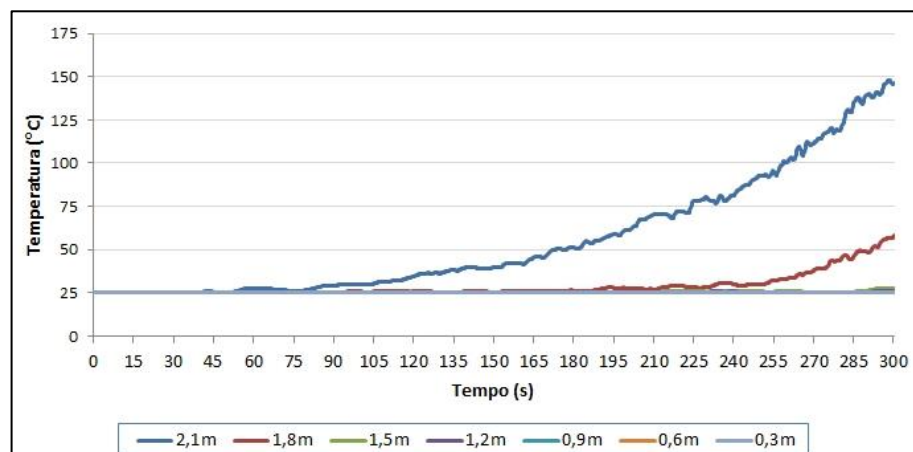


Gráfico 42 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-50plus

Imagem 127 – Instante $t = 0$ s.

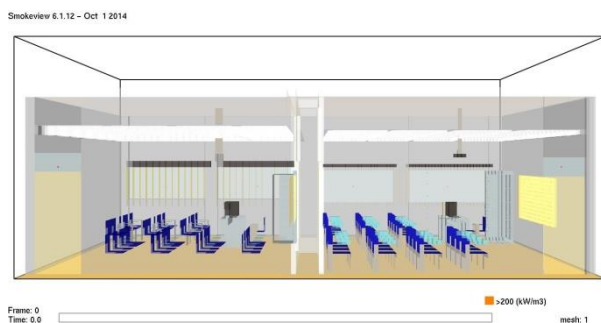


Imagem 128 – Instante $t = 15$ s.

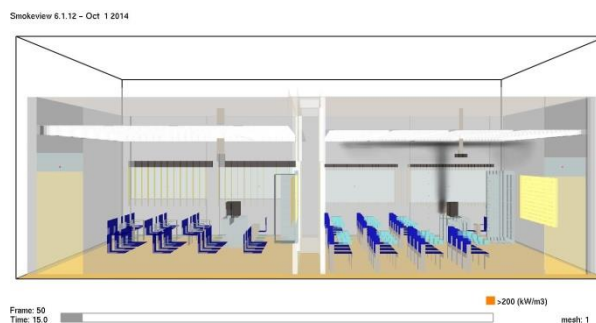


Imagem 129 – Instante $t = 30$ s.

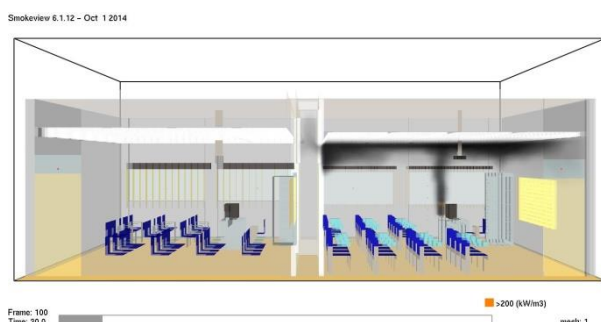


Imagem 130 – Instante $t = 60$ s.

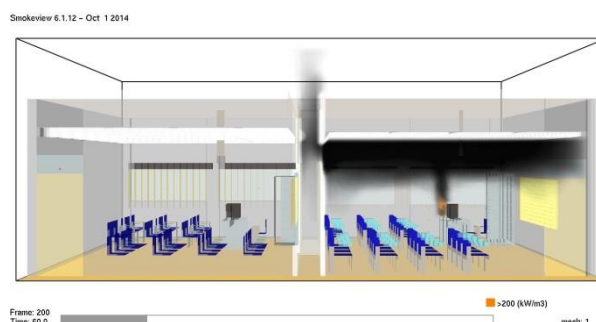


Imagem 131 – Instante $t = 120$ s.

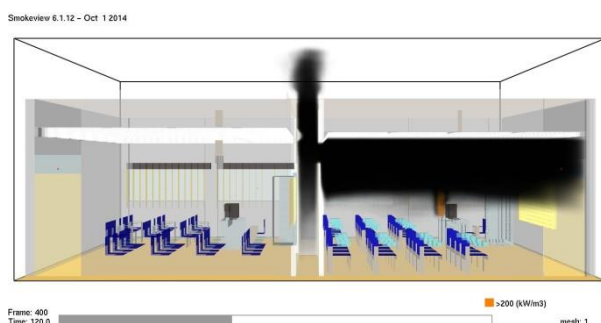


Imagem 132 – Instante $t = 180$ s.

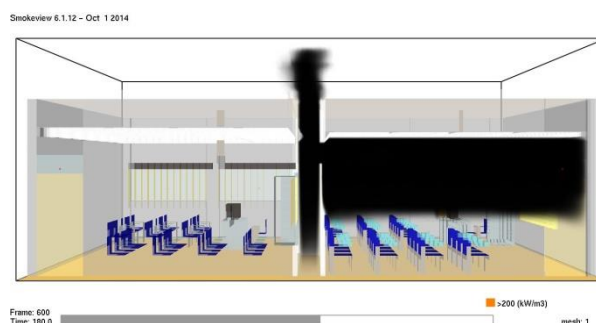


Imagem 133 – Instante $t = 240$ s.

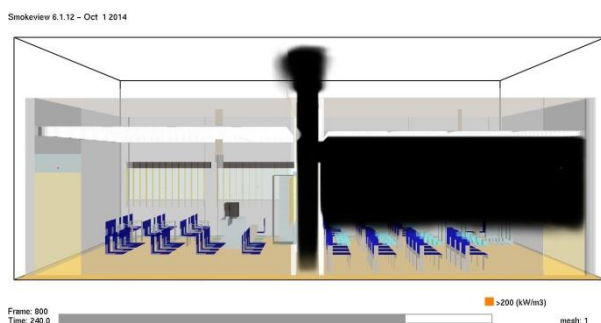


Imagem 134 – Instante $t = 300$ s.

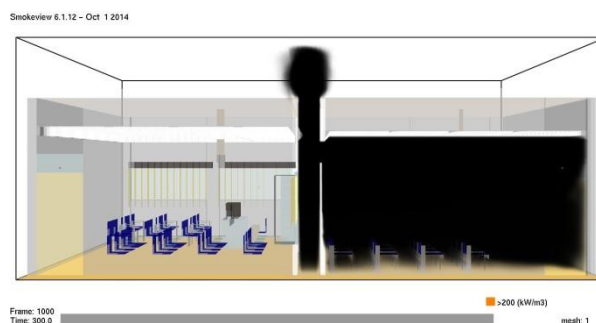


Gráfico 43 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

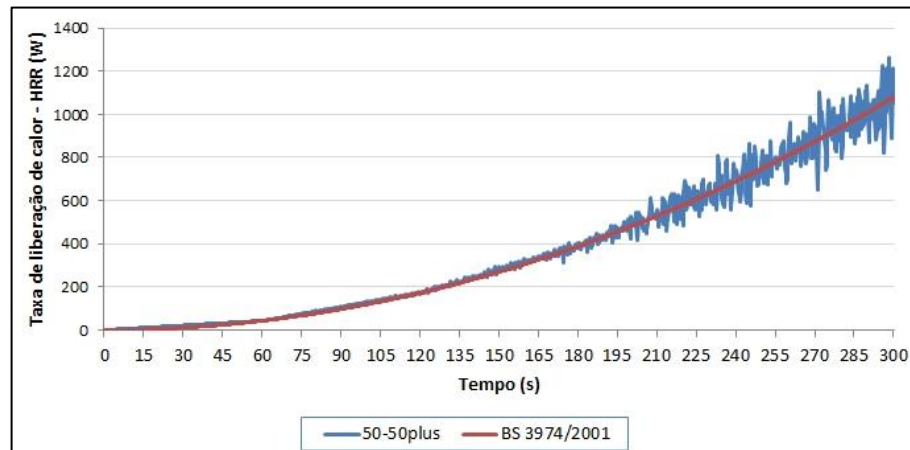


Gráfico 44 – Altura da camada livre de fumaça.

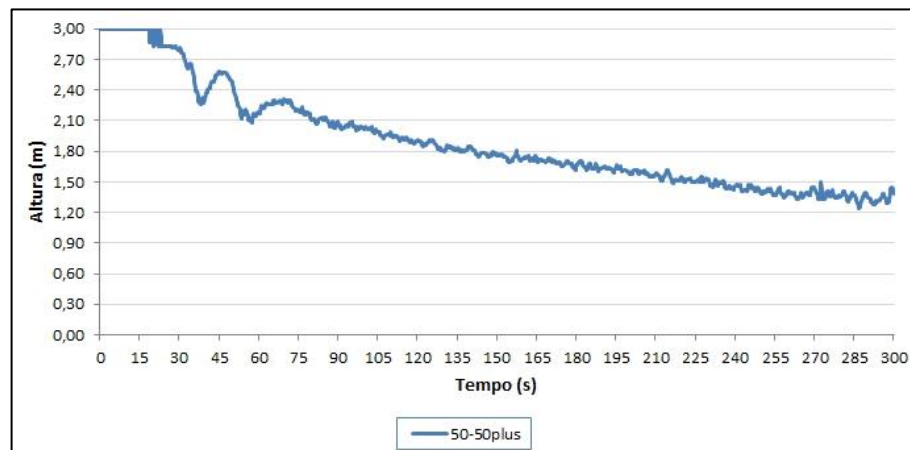
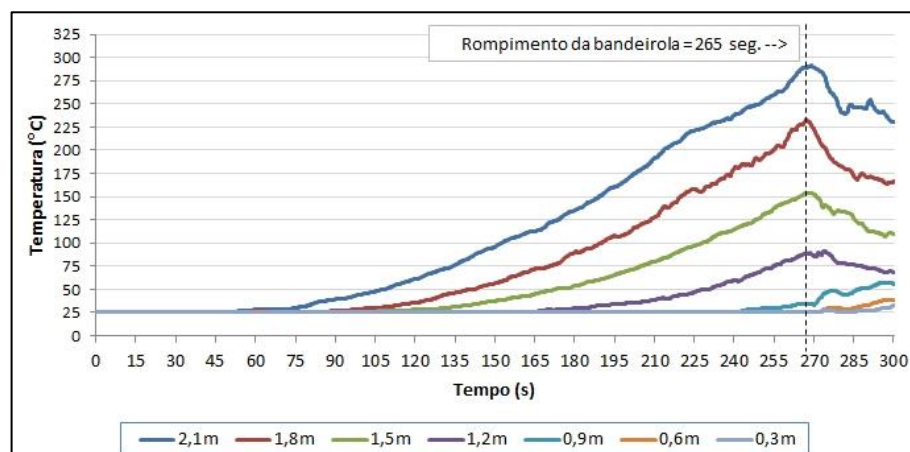


Gráfico 45 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-50plus open

Imagem 135 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 136 – Instante $t = 15$ s.

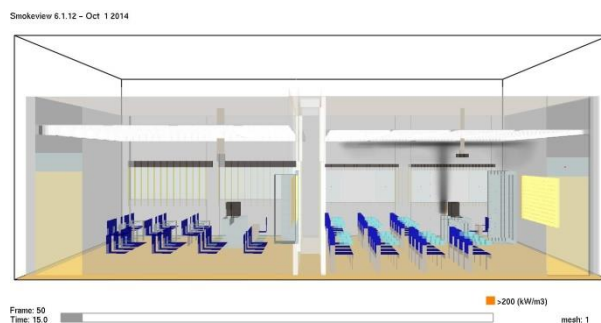


Imagem 137 – Instante $t = 30$ s.

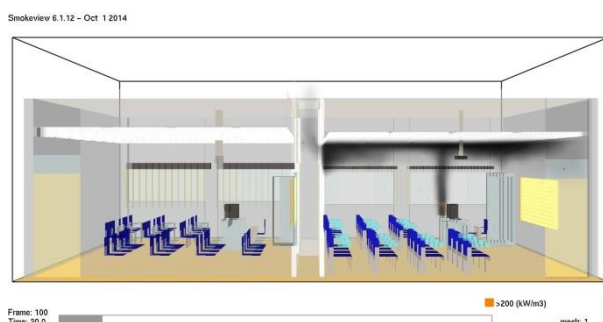


Imagem 138 – Instante $t = 60$ s.

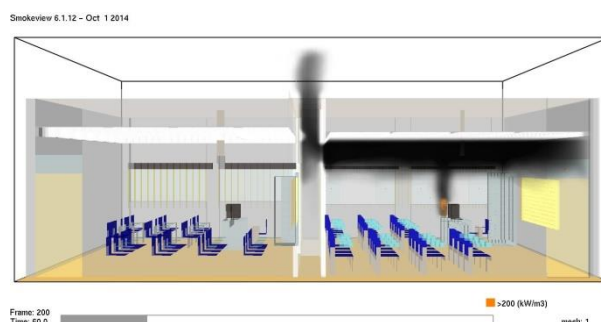


Imagem 139 – Instante $t = 120$ s.

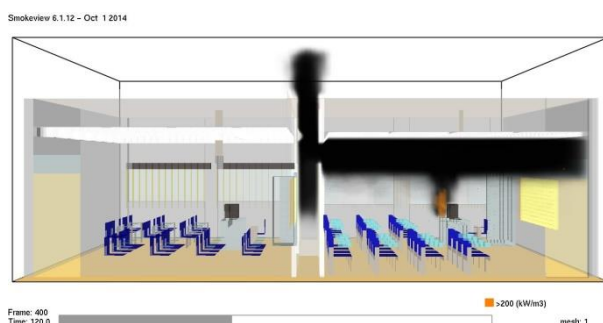


Imagem 140 – Instante $t = 180$ s.

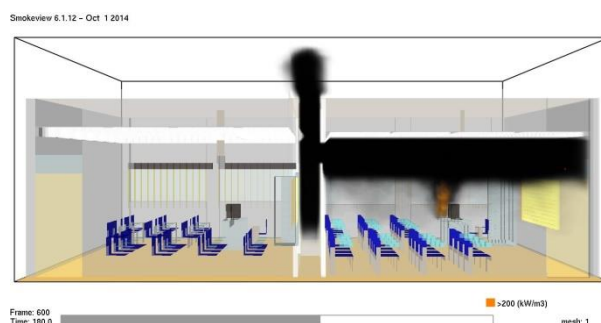


Imagem 141 – Instante $t = 240$ s.

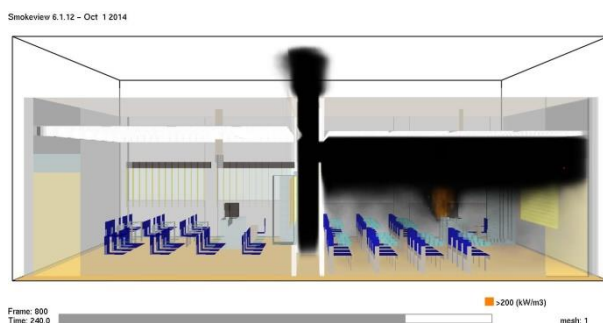


Imagem 142 – Instante $t = 300$ s.

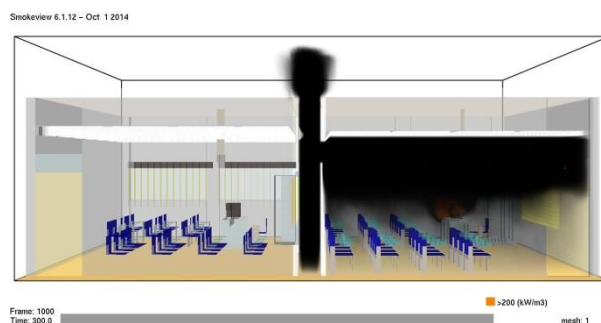


Gráfico 46 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

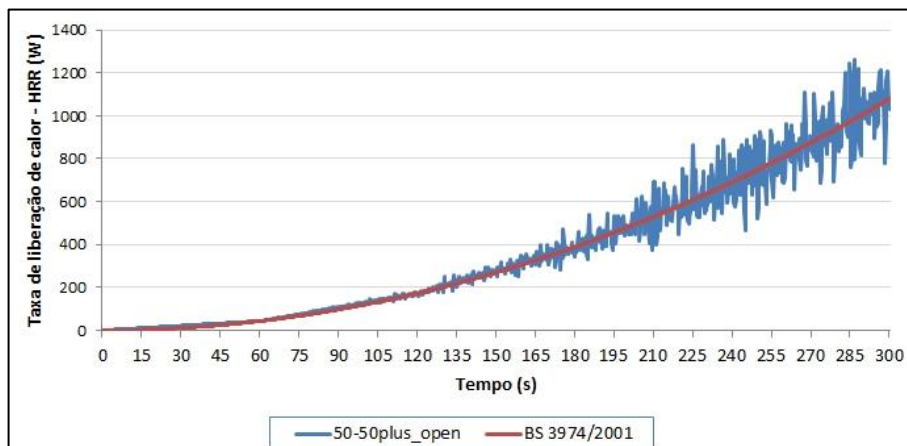


Gráfico 47 – Altura da camada livre de fumaça.

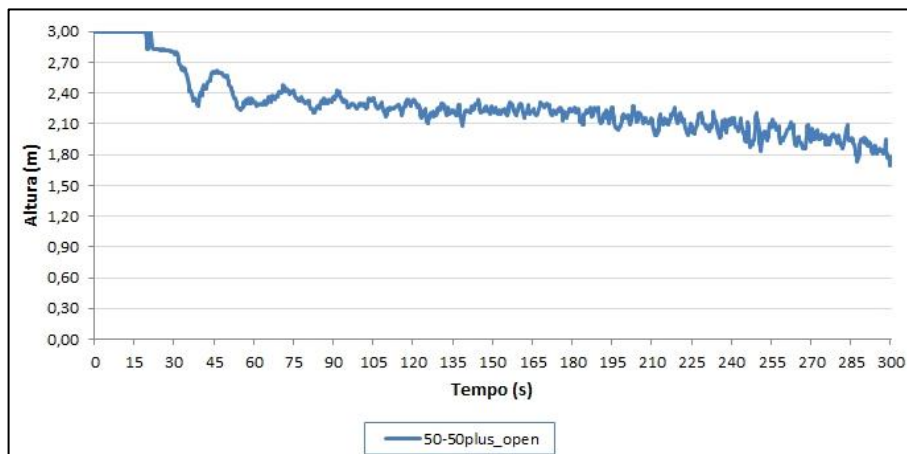
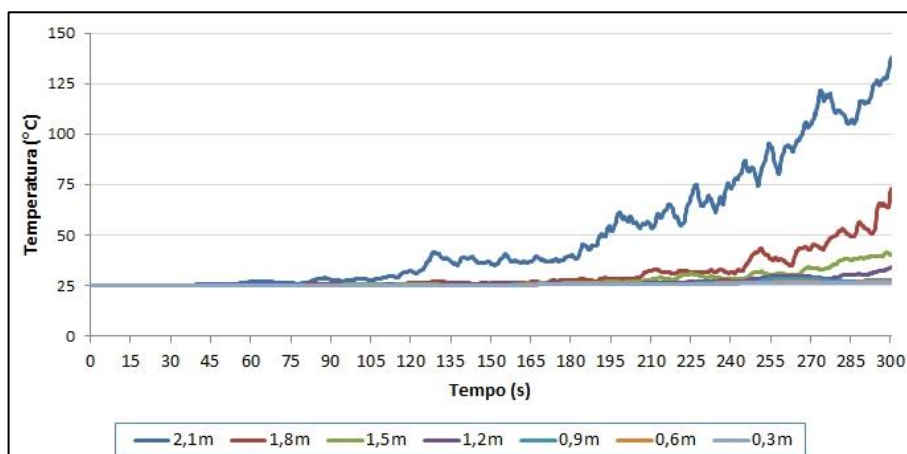


Gráfico 48 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-75plus

Imagem 143 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 144 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 145 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 146 – Instante $t = 60$ s.

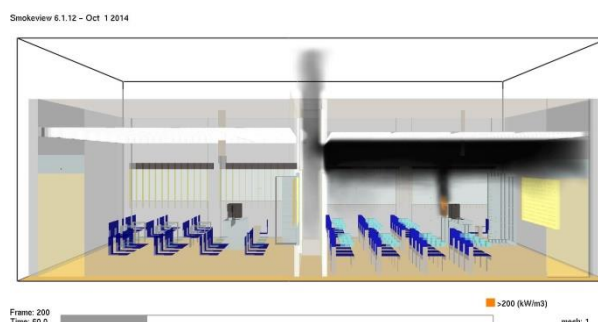


Imagem 147 – Instante $t = 120$ s.

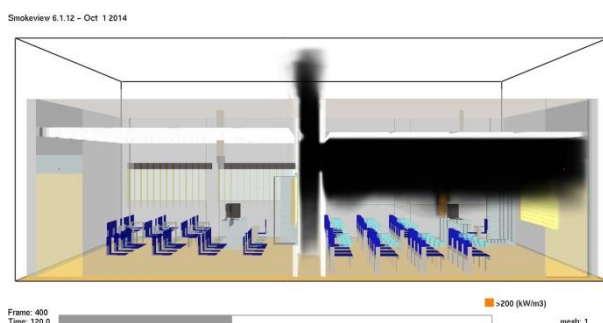


Imagem 148 – Instante $t = 180$ s.

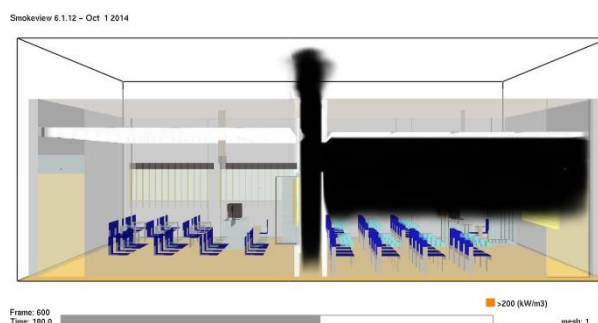


Imagem 149 – Instante $t = 240$ s.

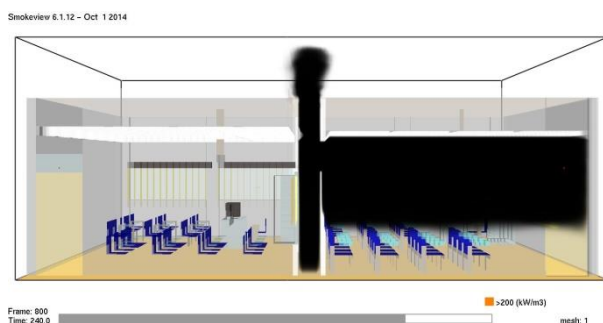


Imagem 150 – Instante $t = 300$ s.

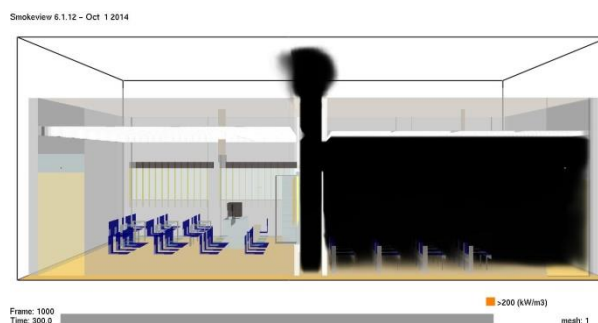


Gráfico 49 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normatizada e simulada.

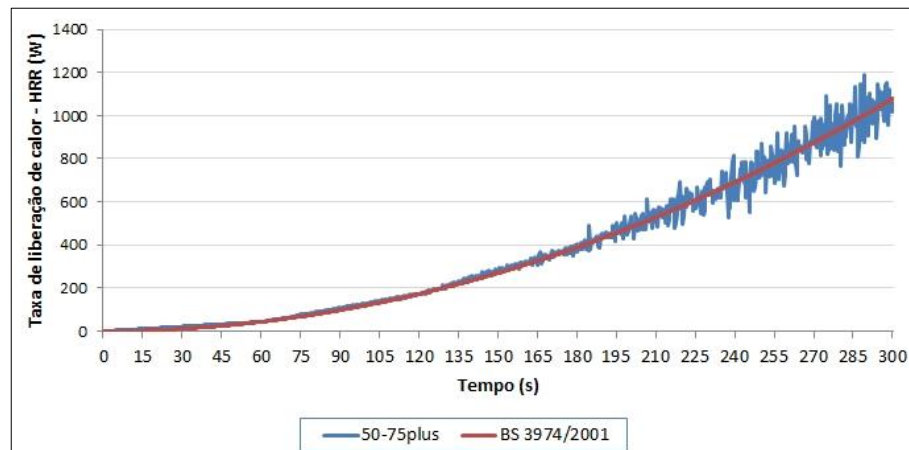


Gráfico 50 – Altura da camada livre de fumaça.

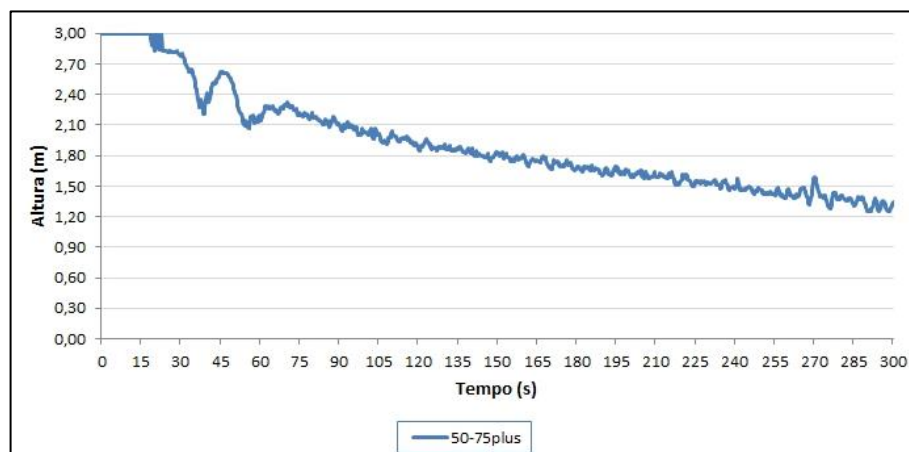
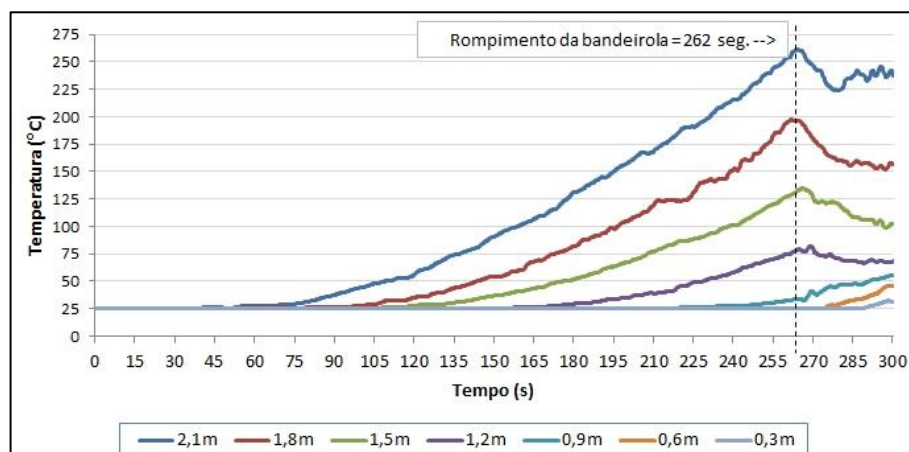


Gráfico 51 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-75plus open

Imagem 151 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 152 – Instante $t = 15$ s.

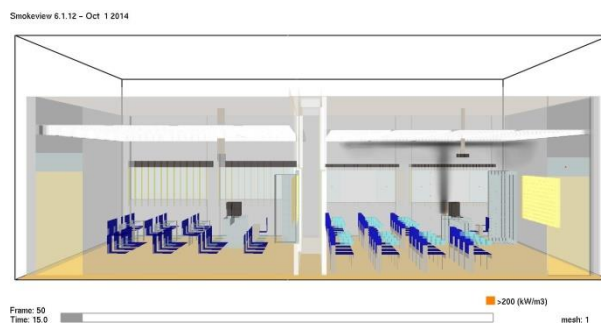


Imagem 153 – Instante $t = 30$ s.

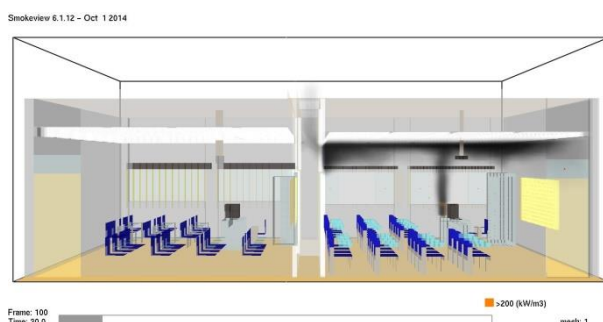


Imagem 154 – Instante $t = 60$ s.

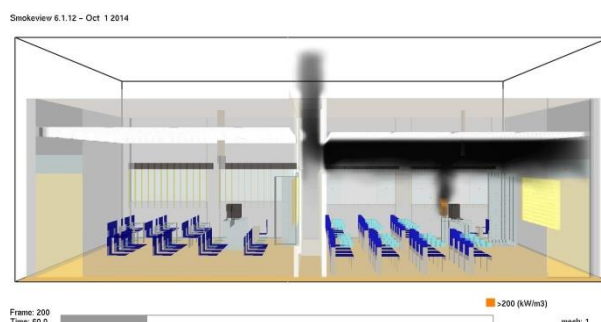


Imagem 155 – Instante $t = 120$ s.

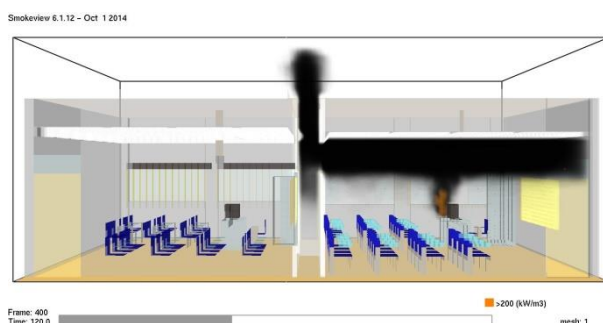


Imagem 156 – Instante $t = 180$ s.

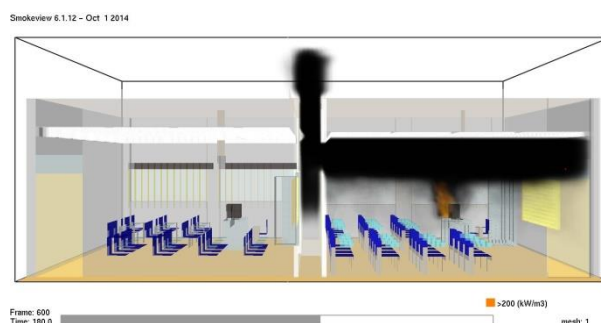


Imagem 157 – Instante $t = 240$ s.

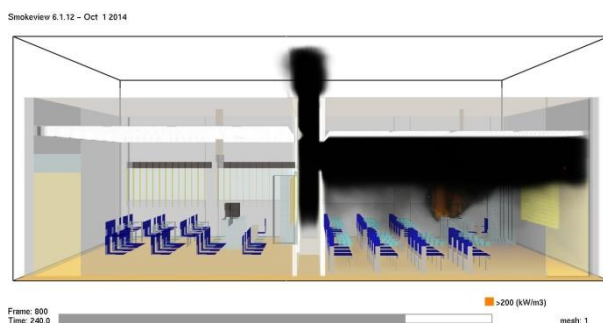


Imagem 158 – Instante $t = 300$ s.

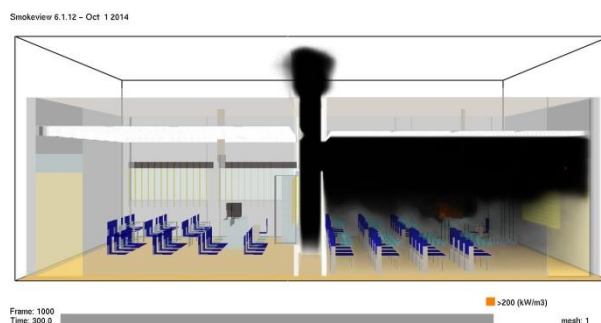


Gráfico 52 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

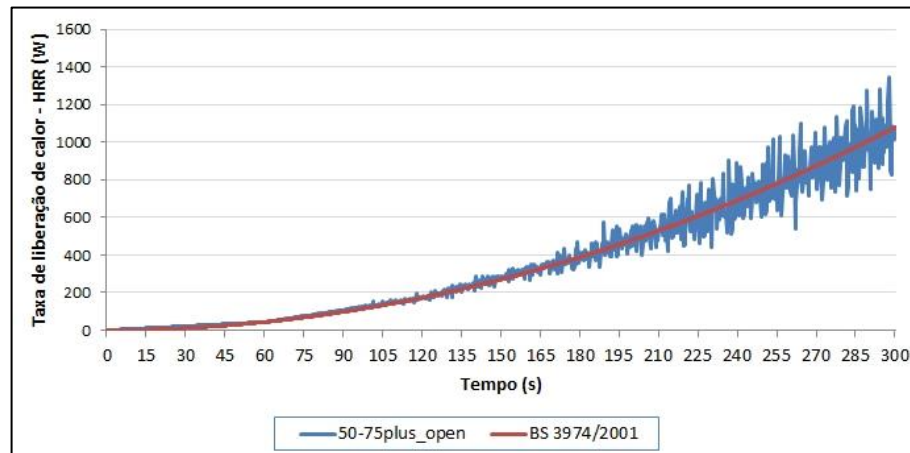


Gráfico 53 – Altura da camada livre de fumaça.

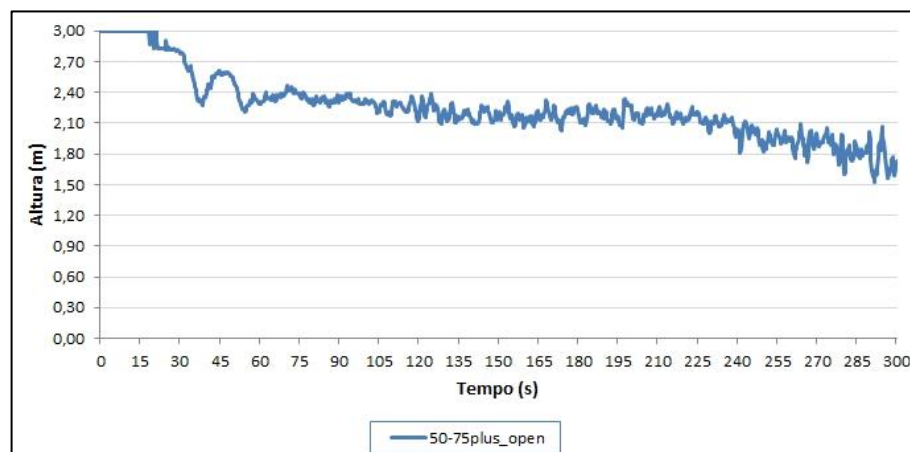
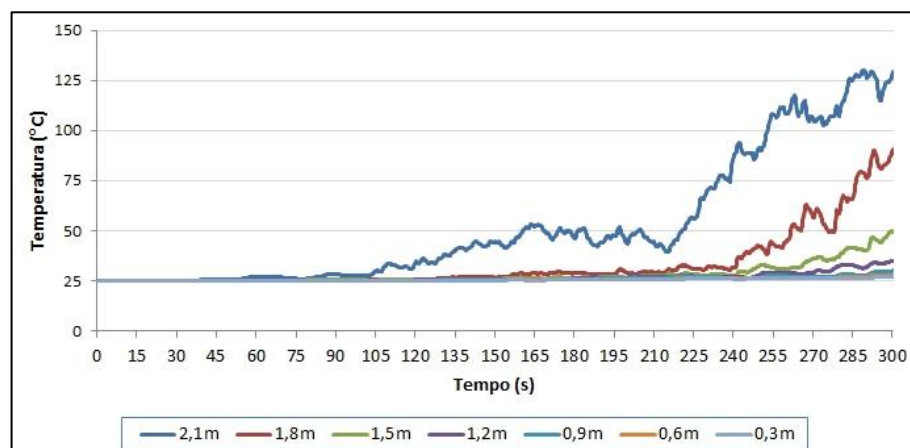


Gráfico 54 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-100plus

Imagem 159 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 160 – Instante $t = 15$ s.

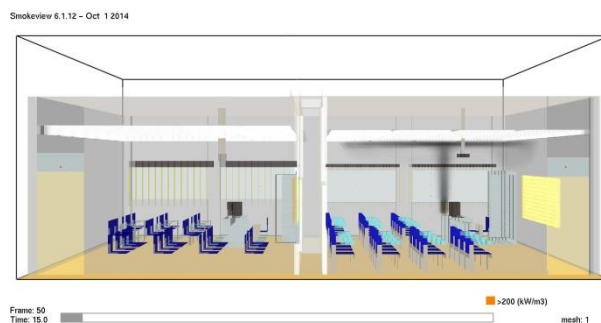


Imagem 161 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 162 – Instante $t = 60$ s.

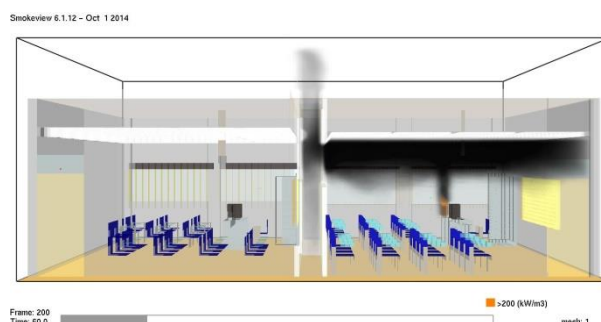


Imagem 163 – Instante $t = 120$ s.

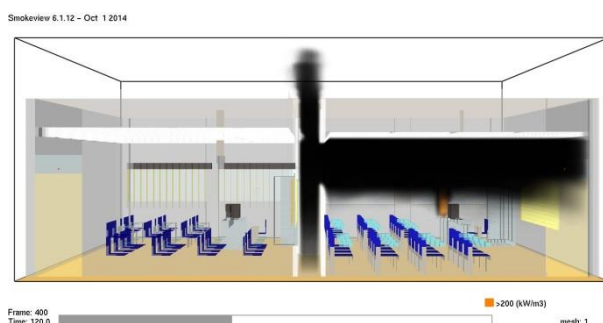


Imagem 164 – Instante $t = 180$ s.

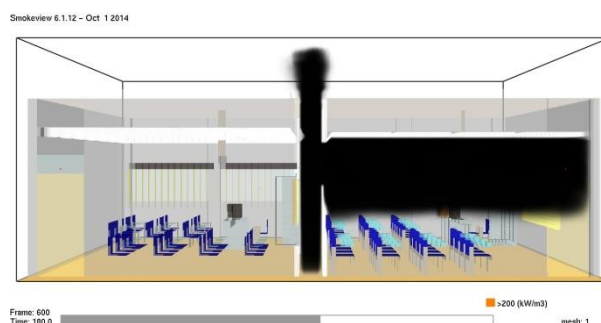


Imagem 165 – Instante $t = 240$ s.

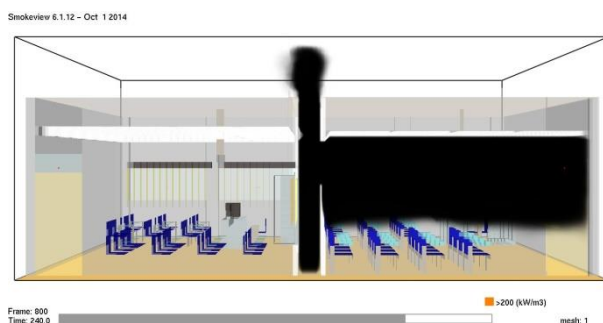


Imagem 166 – Instante $t = 285$ s.

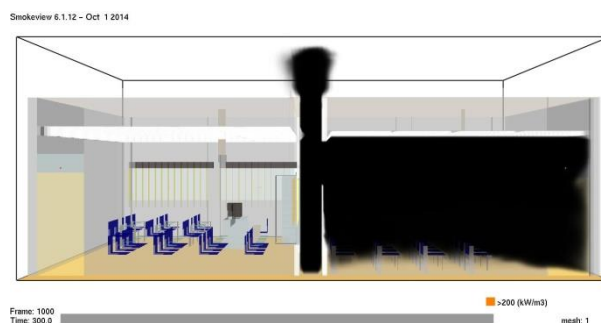


Gráfico 55 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

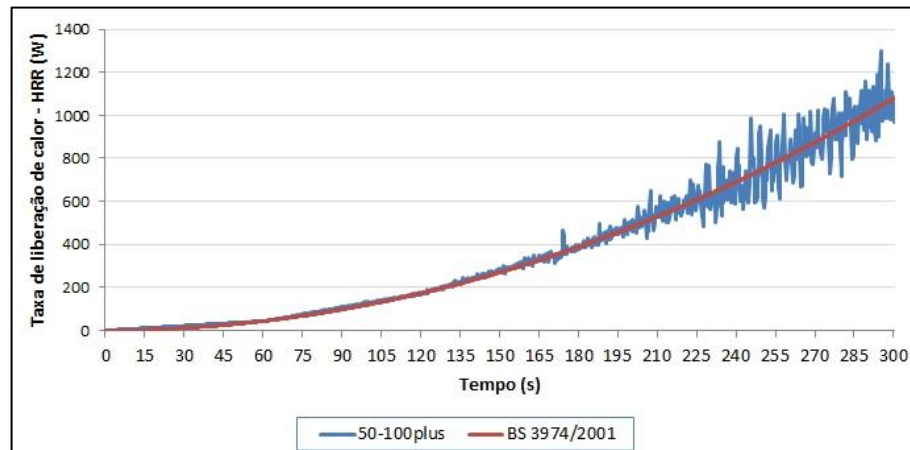


Gráfico 56 – Altura da camada livre de fumaça.

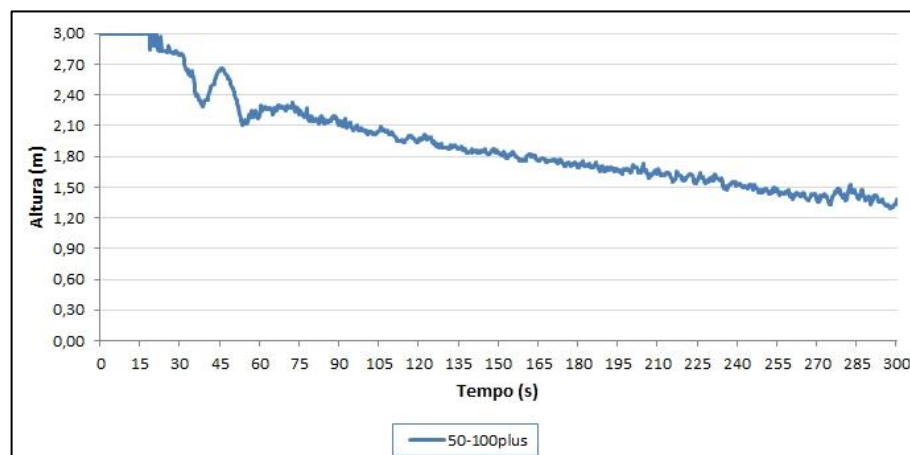
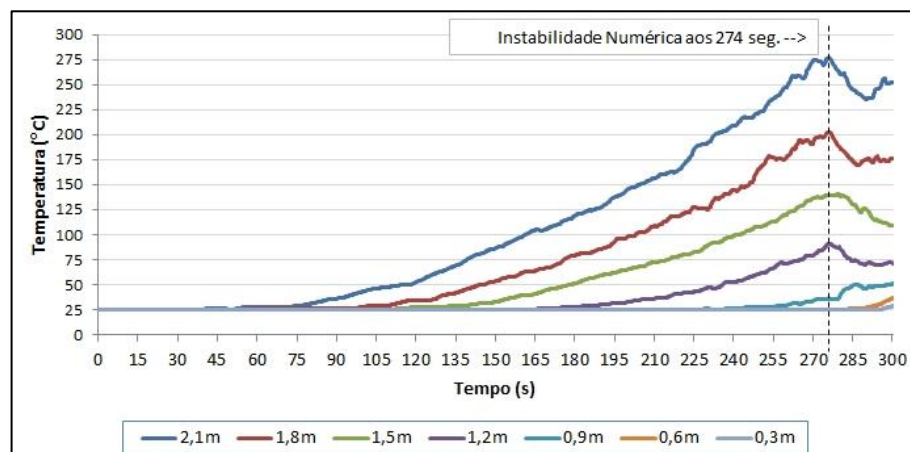


Gráfico 57 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 50-100plus open

Imagem 167 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 168 – Instante $t = 15$ s.

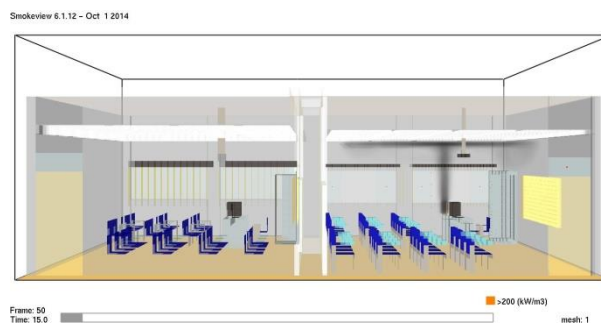


Imagem 169 – Instante $t = 30$ s.

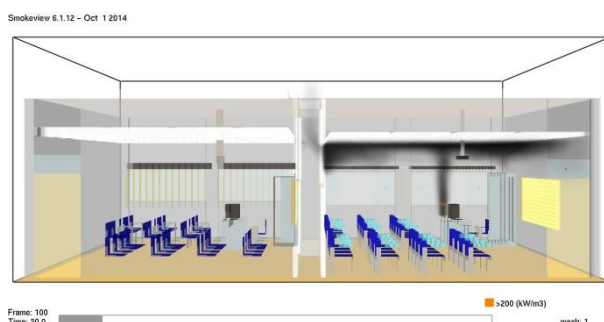


Imagem 170 – Instante $t = 60$ s.

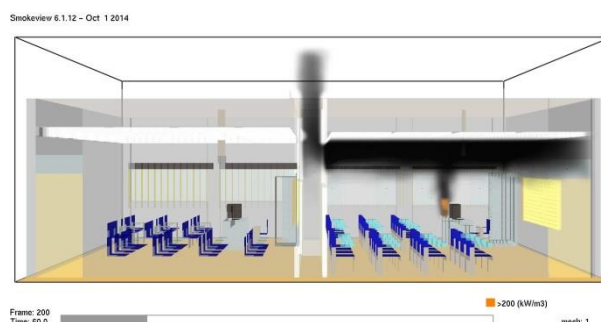


Imagem 171 – Instante $t = 120$ s.

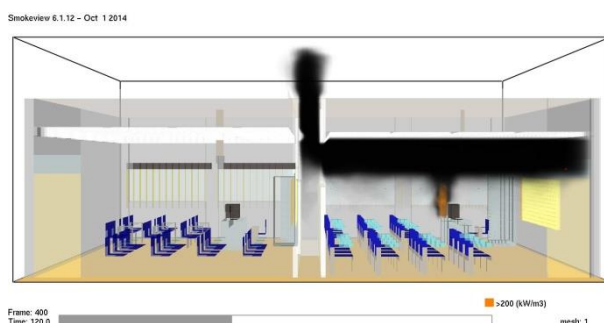


Imagem 172 – Instante $t = 180$ s.

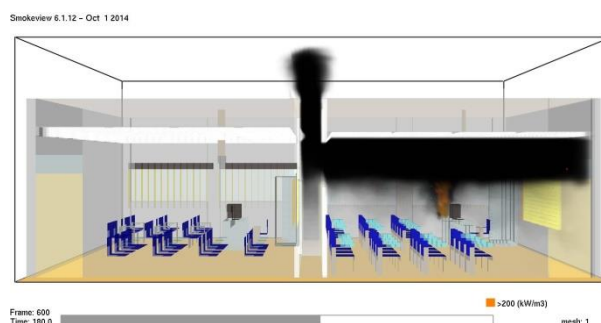


Imagem 173 – Instante $t = 240$ s.

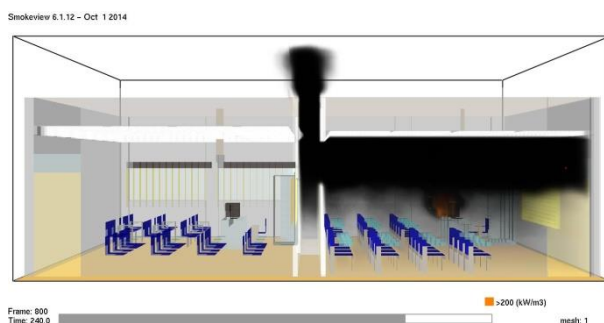


Imagem 174 – Instante $t = 300$ s.

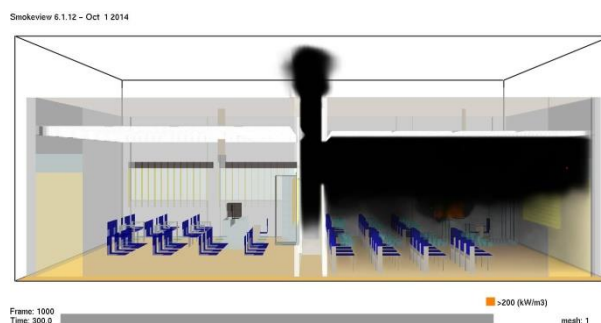


Gráfico 58 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

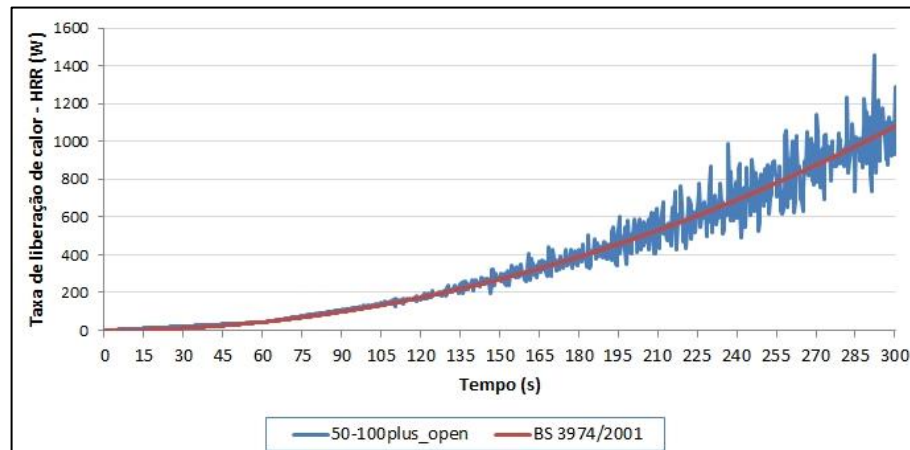


Gráfico 59 – Altura da camada livre de fumaça.

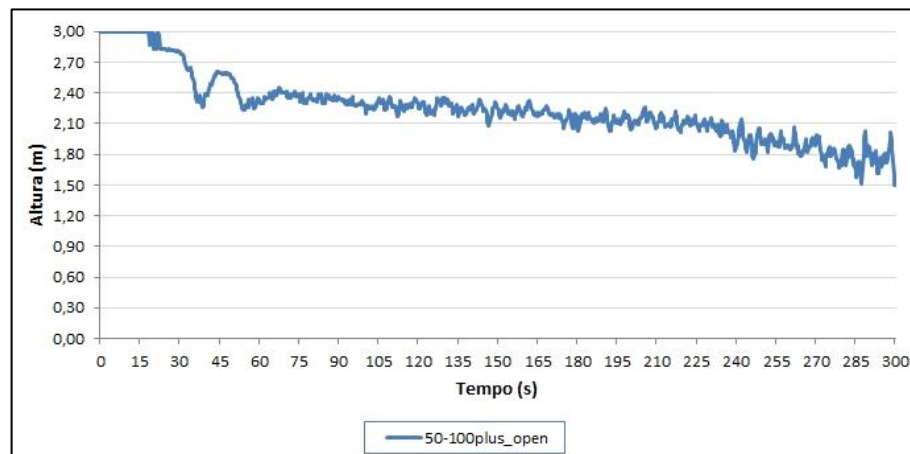
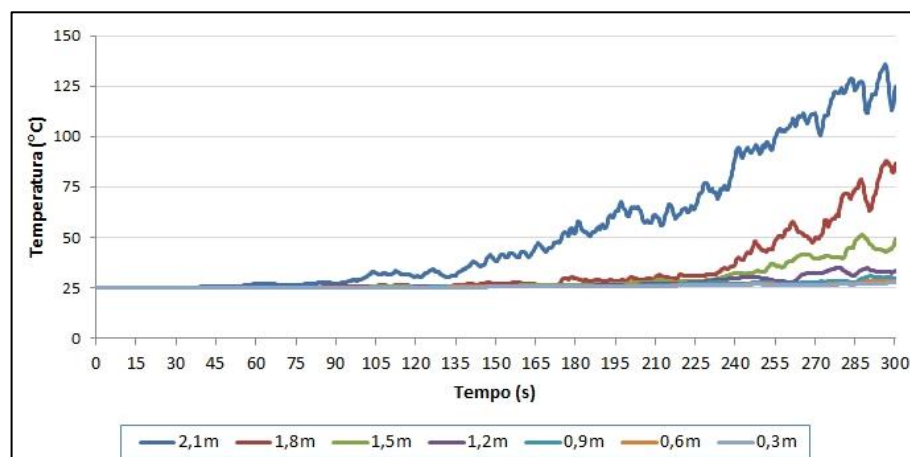


Gráfico 60 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-25plus

Imagem 175 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 176 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 177 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 178 – Instante $t = 60$ s.

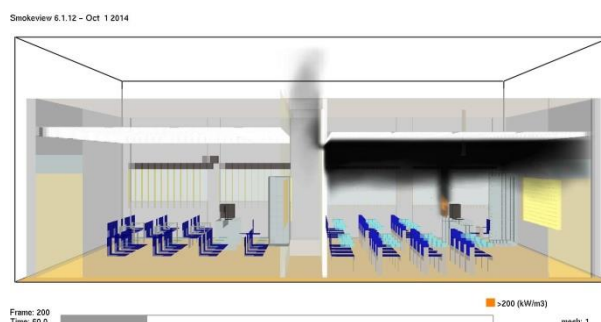


Imagem 179 – Instante $t = 120$ s.

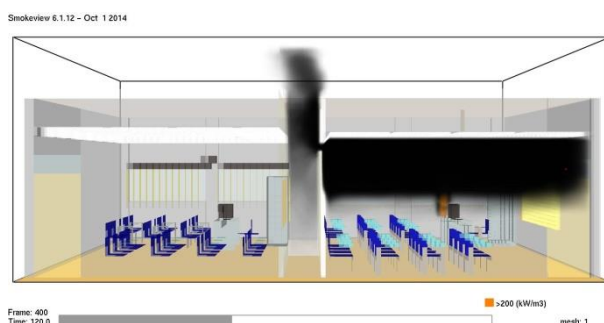


Imagem 180 – Instante $t = 180$ s.

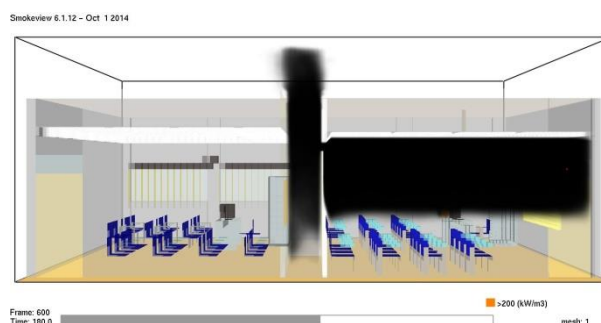


Imagem 181 – Instante $t = 240$ s.

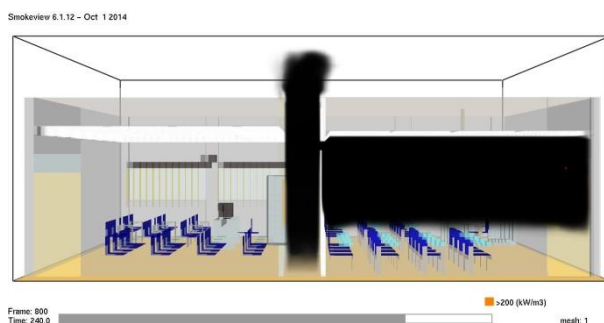


Imagem 182 – Instante $t = 300$ s.

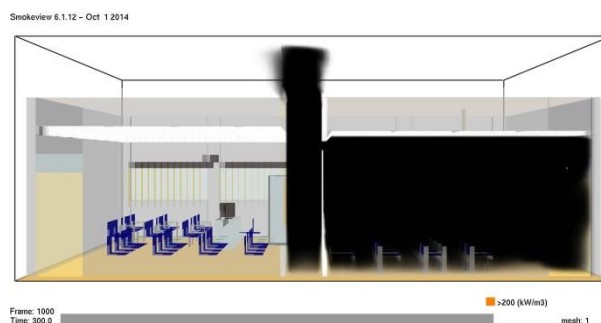


Gráfico 61 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

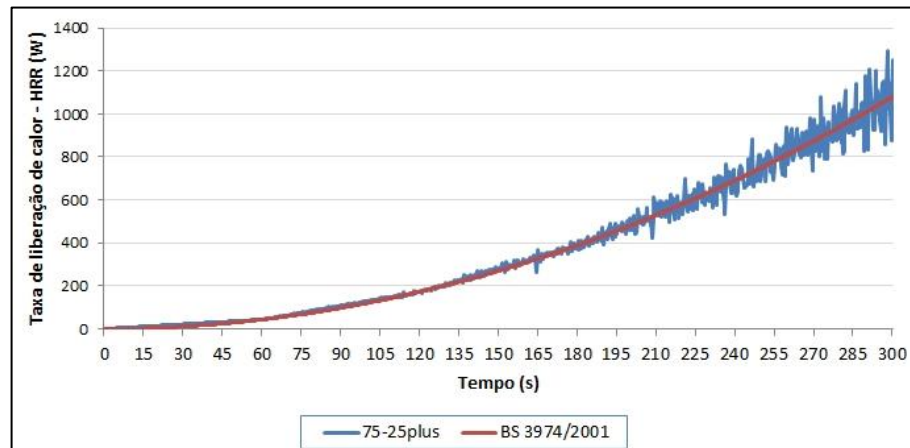


Gráfico 62 – Altura da camada livre de fumaça.

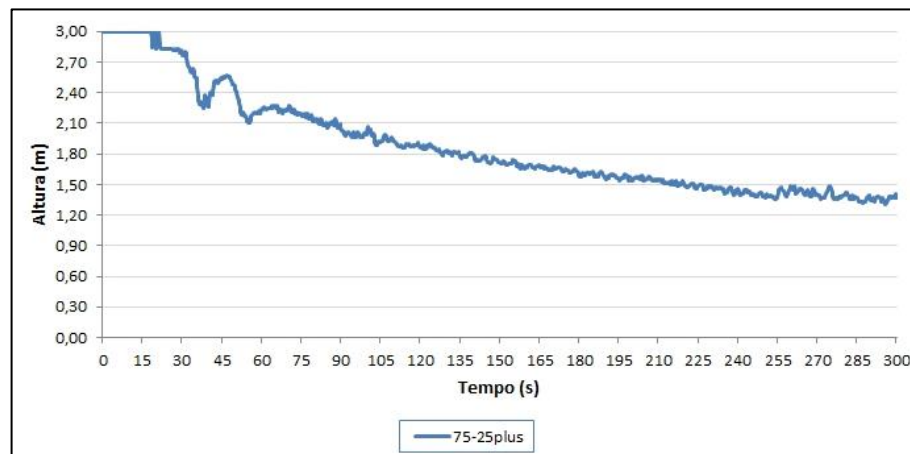
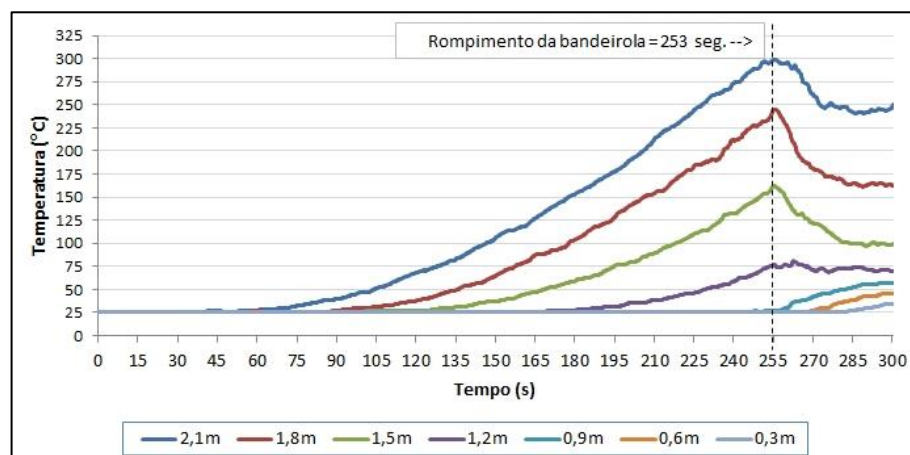


Gráfico 63 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-25plus_open

Imagem 183 – Instante $t = 0s$.



Imagem 184 – Instante $t = 15s$.



Imagem 185 – Instante $t = 30s$.



Imagem 186 – Instante $t = 60s$.

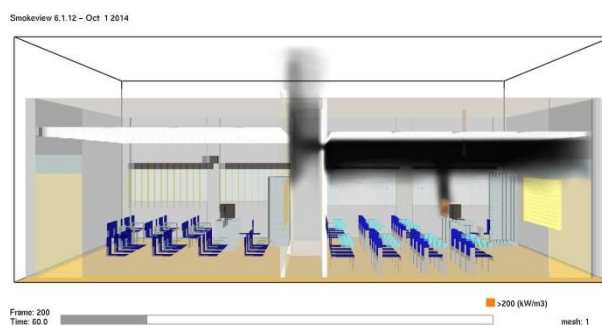


Imagem 187 – Instante $t = 120s$.

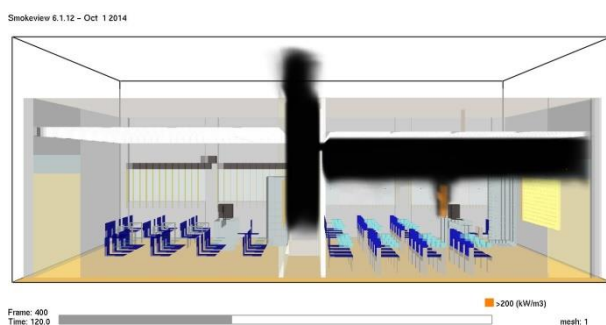


Imagem 188 – Instante $t = 180s$.

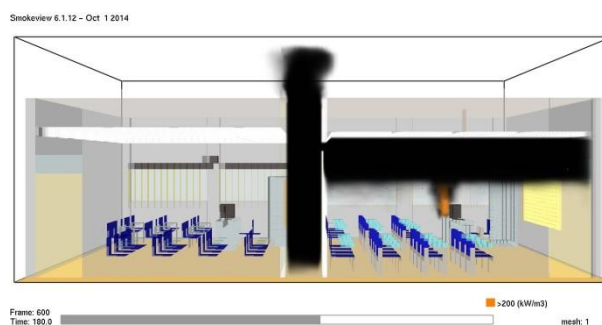


Imagem 189 – Instante $t = 240s$.

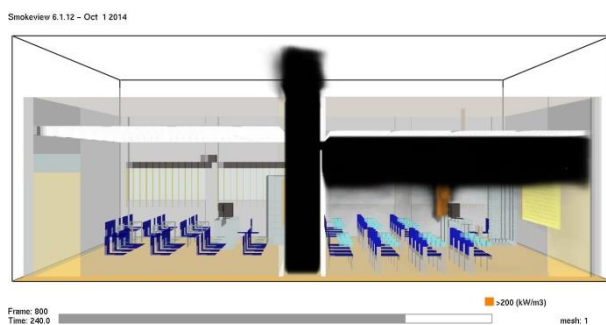


Imagem 190 – Instante $t = 300s$.

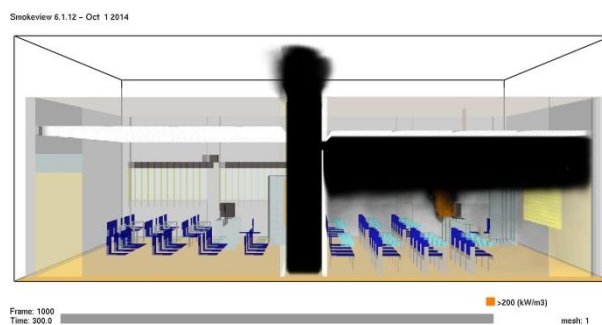


Gráfico 64 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

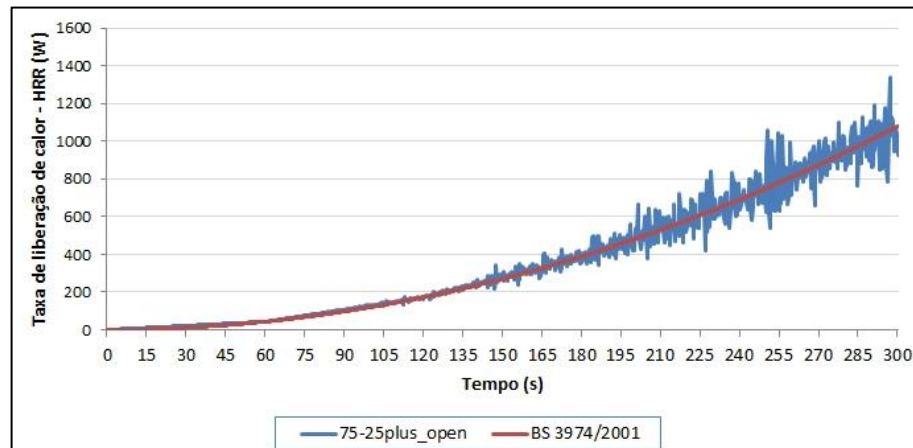


Gráfico 65 – Altura da camada livre de fumaça.

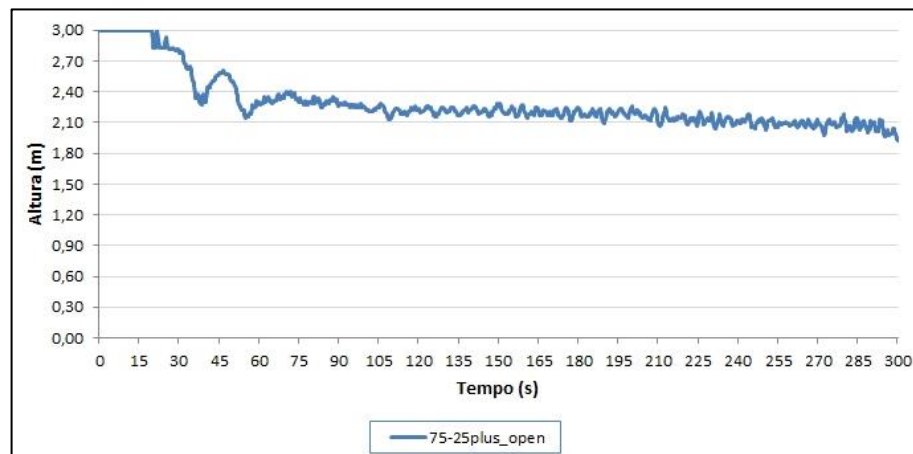
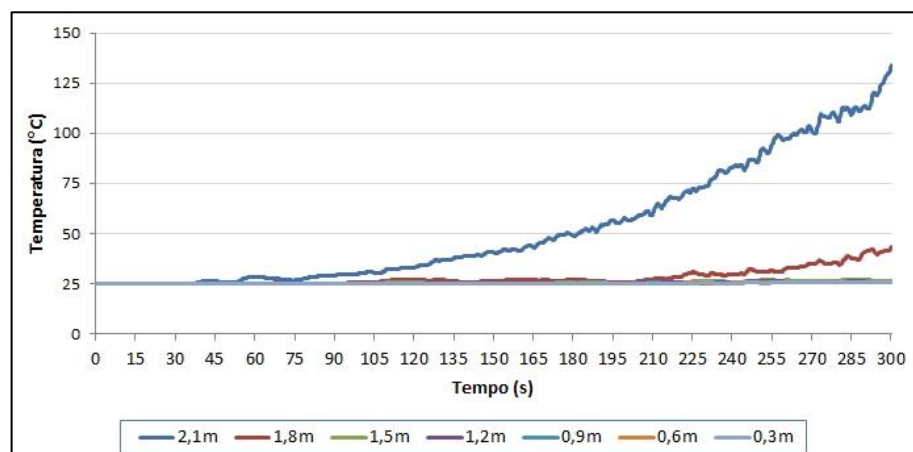


Gráfico 66 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-50plus

Imagem 191 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 192 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 193 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 194 – Instante $t = 60$ s.

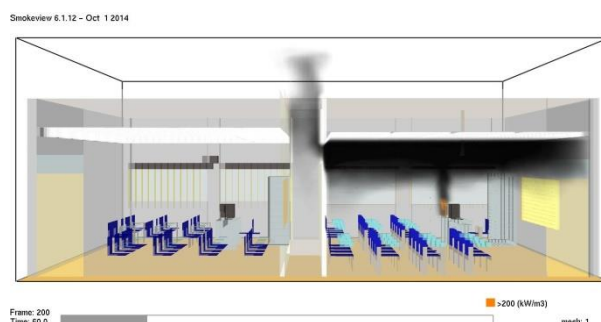


Imagem 195 – Instante $t = 120$ s.



Imagem 196 – Instante $t = 180$ s.

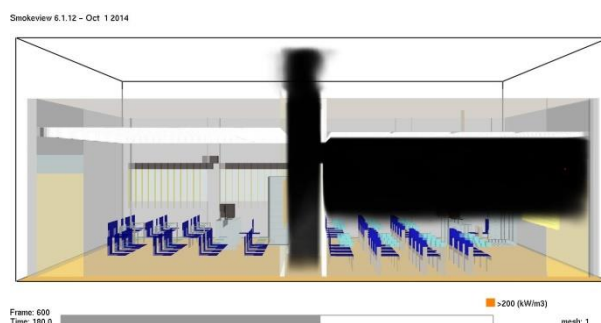


Imagem 197 – Instante $t = 240$ s.

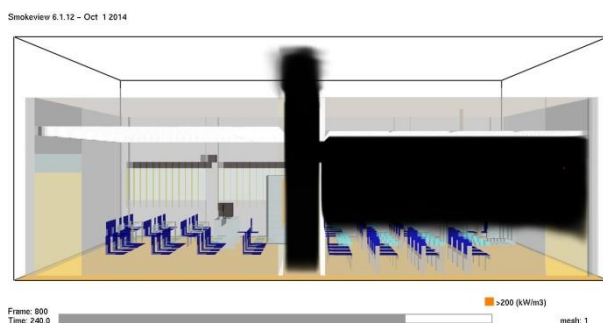


Imagem 198 – Instante $t = 300$ s.

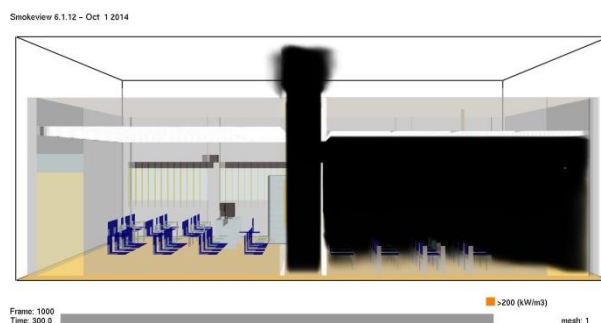


Gráfico 67 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

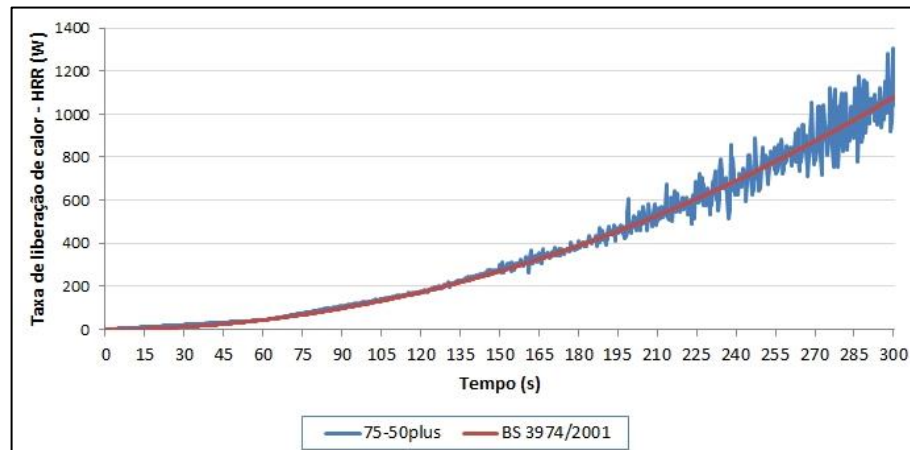


Gráfico 68 – Altura da camada livre de fumaça.

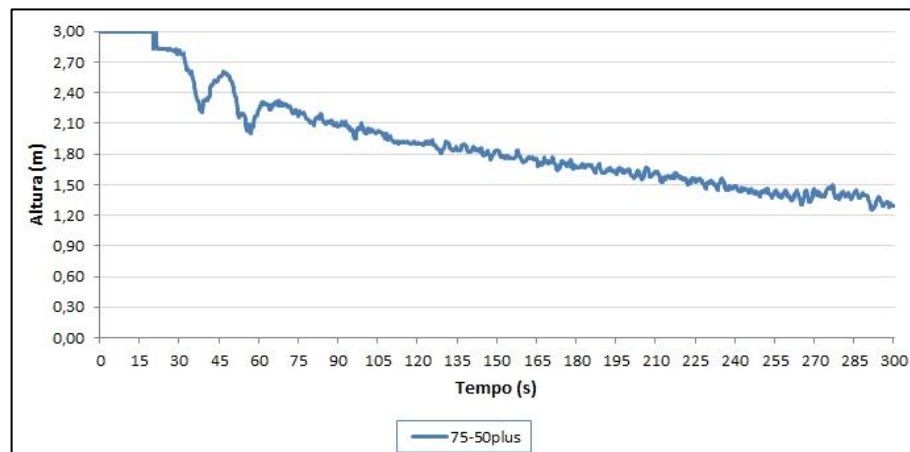
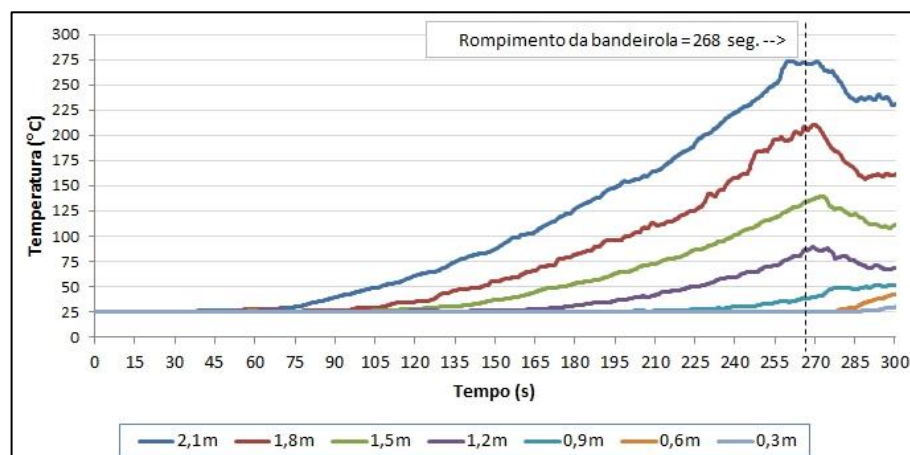


Gráfico 69 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-50plus_open

Imagem 199 – Instante $t = 0s$.



Imagem 200 – Instante $t = 15s$.



Imagem 201 – Instante $t = 30s$.



Imagem 202 – Instante $t = 60s$.



Imagem 203 – Instante $t = 120s$.

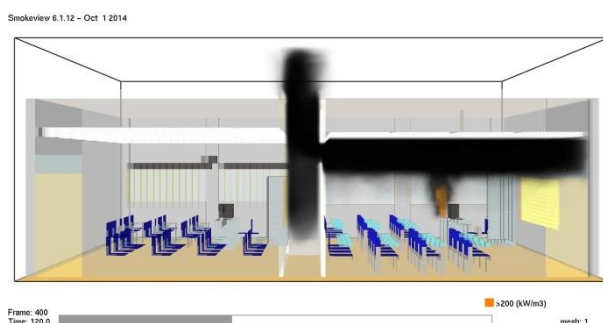


Imagem 204 – Instante $t = 180s$.

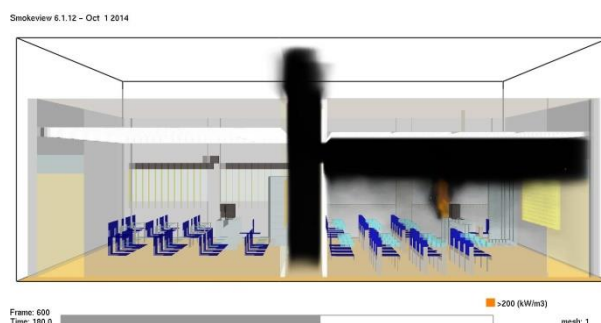


Imagem 205 – Instante $t = 240s$.

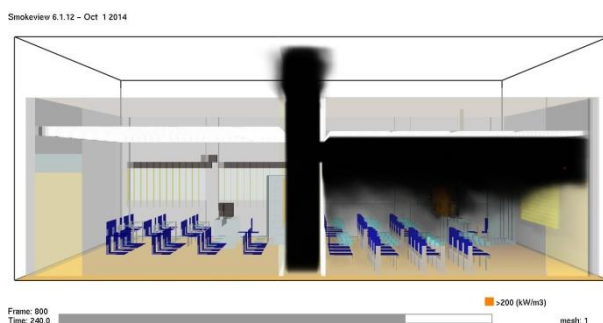


Imagem 206 – Instante $t = 300s$.

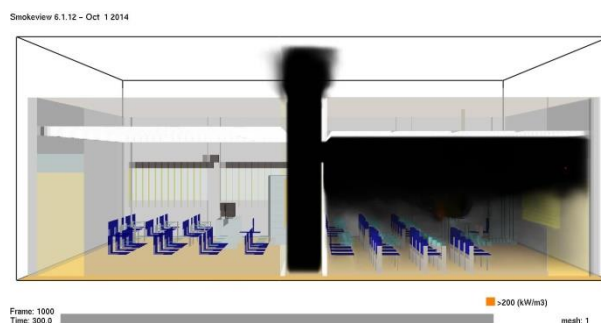


Gráfico 70 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

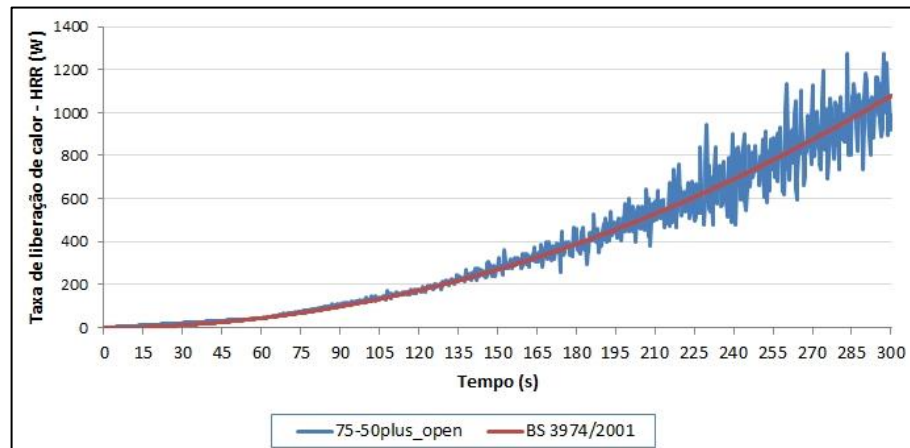


Gráfico 71 – Altura da camada livre de fumaça.

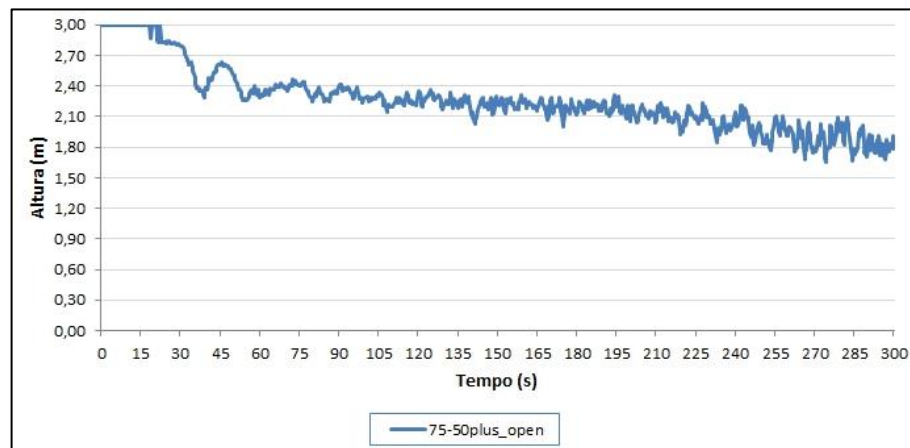
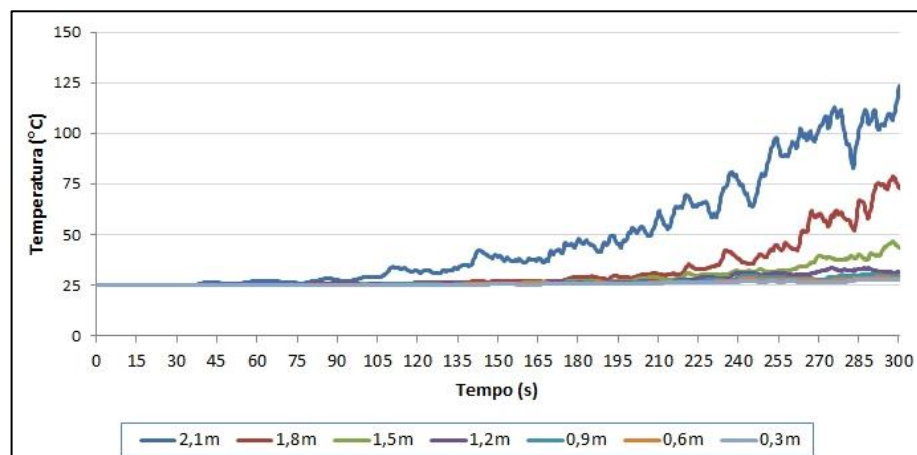


Gráfico 72 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-75plus

Imagem 207 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 208 – Instante $t = 15$ s.

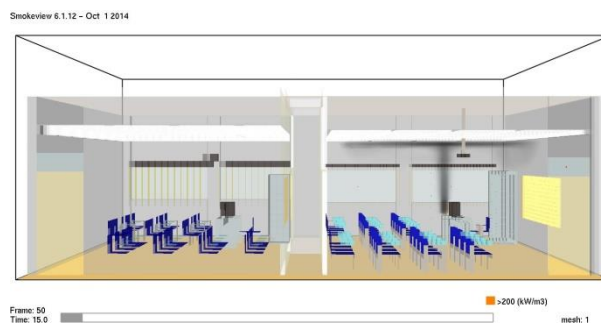


Imagem 209 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 210 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 211 – Instante $t = 120$ s.

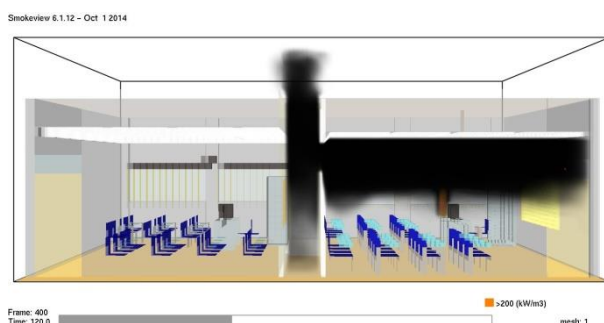


Imagem 212 – Instante $t = 180$ s.

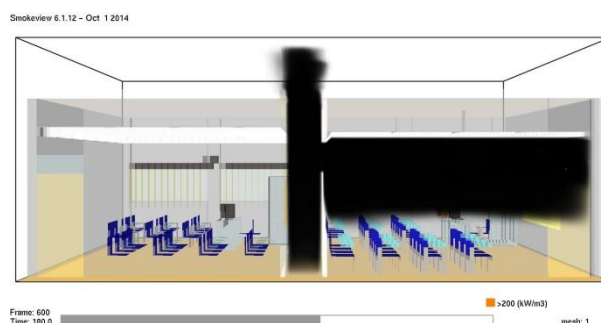


Imagem 213 – Instante $t = 240$ s.

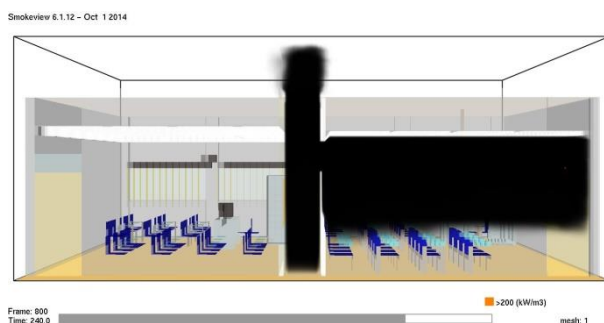


Imagem 214 – Instante $t = 300$ s.

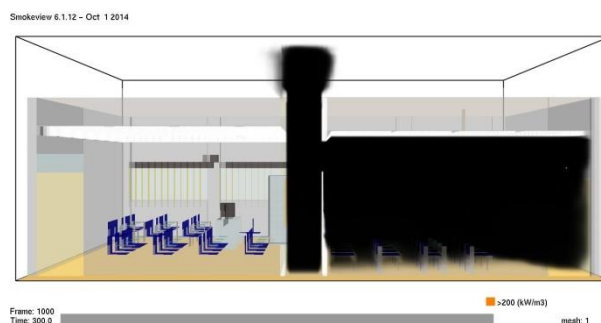


Gráfico 73 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

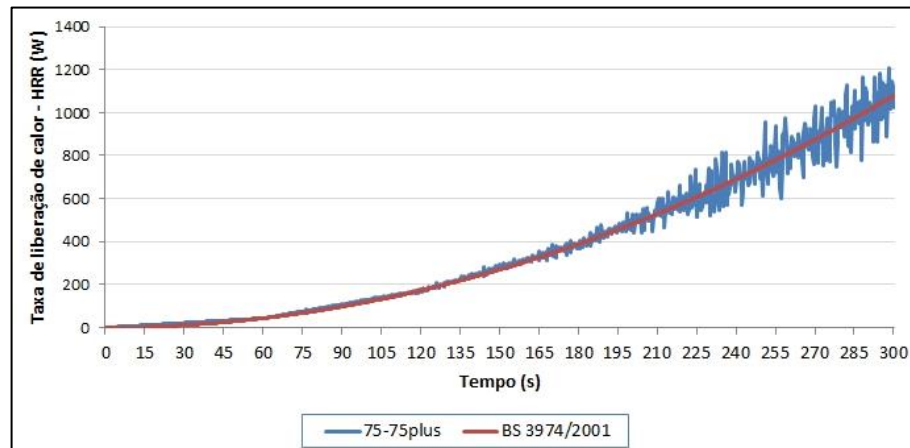


Gráfico 74 – Altura da camada livre de fumaça.

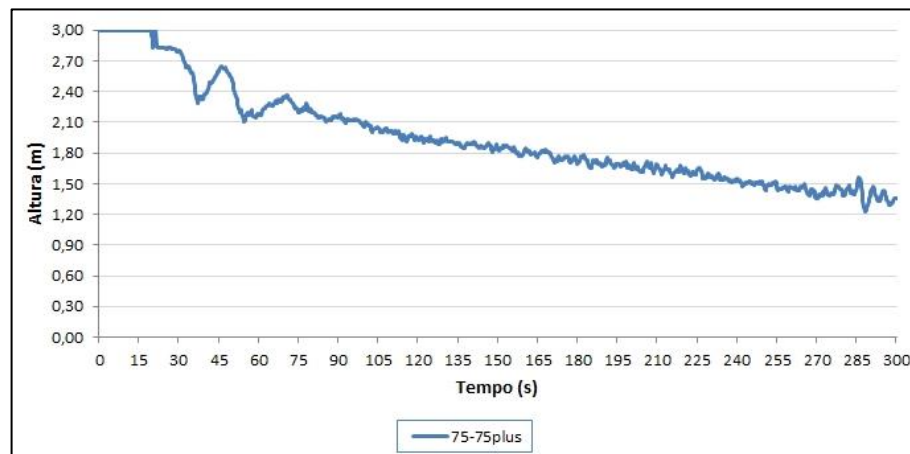
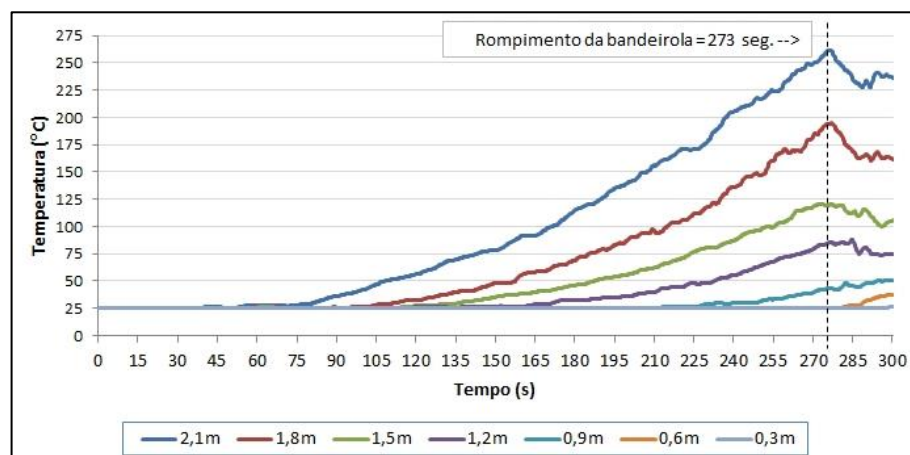


Gráfico 75 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-75plus open

Imagem 215 – Instante $t = 0s$.



Imagem 216 – Instante $t = 15s$.



Imagem 217 – Instante $t = 30s$.

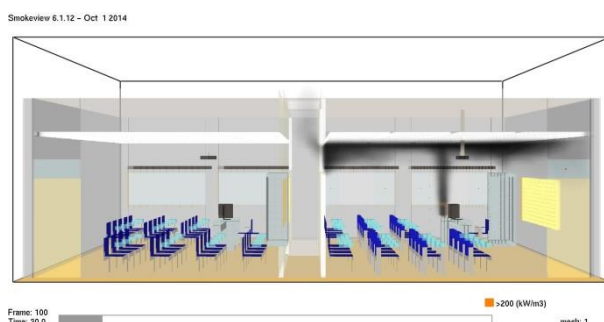


Imagem 218 – Instante $t = 60s$.

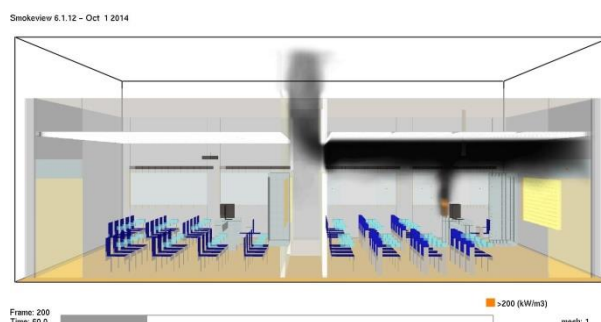


Imagem 219 – Instante $t = 120s$.

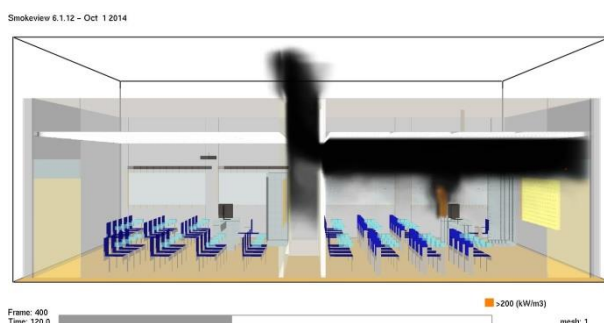


Imagem 220 – Instante $t = 180s$.

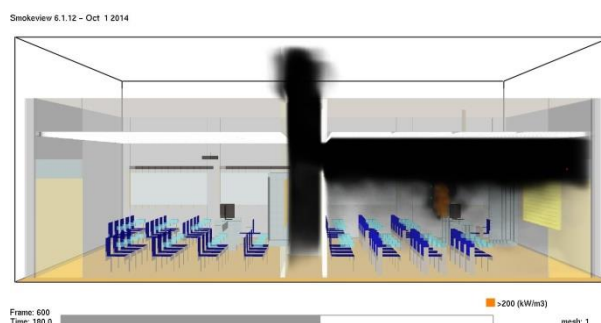


Imagem 221 – Instante $t = 240s$.

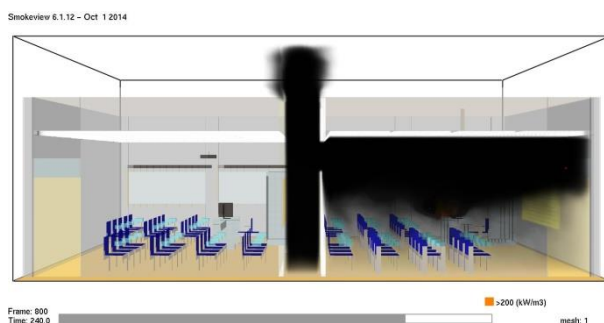


Imagem 222 – Instante $t = 300s$.

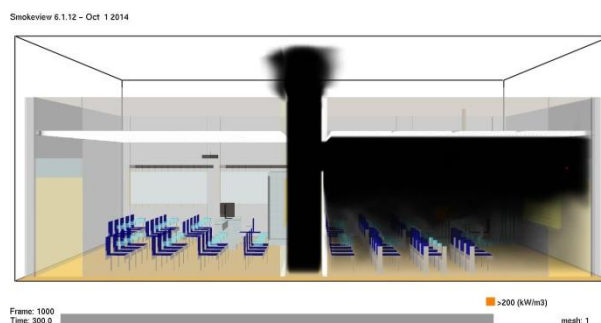


Gráfico 76 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

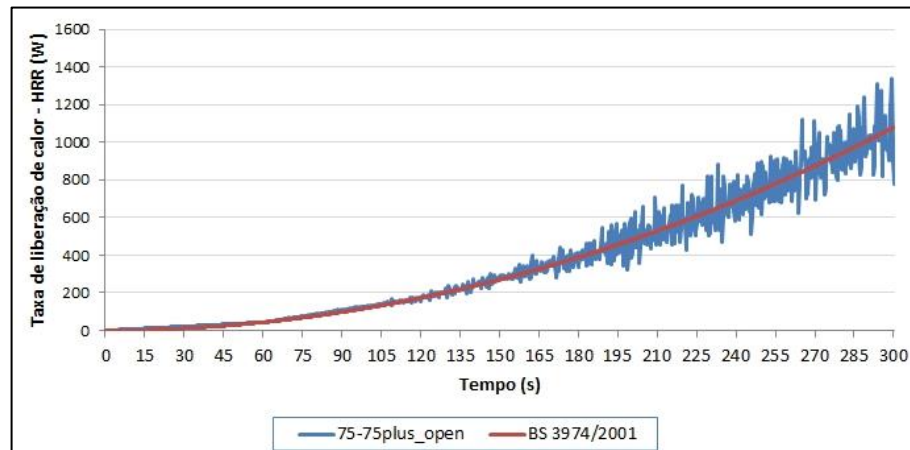


Gráfico 77 – Altura da camada livre de fumaça.

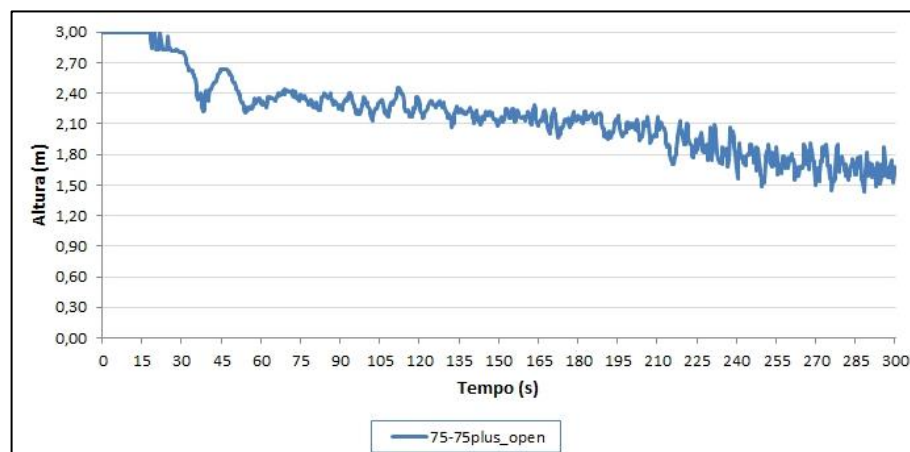
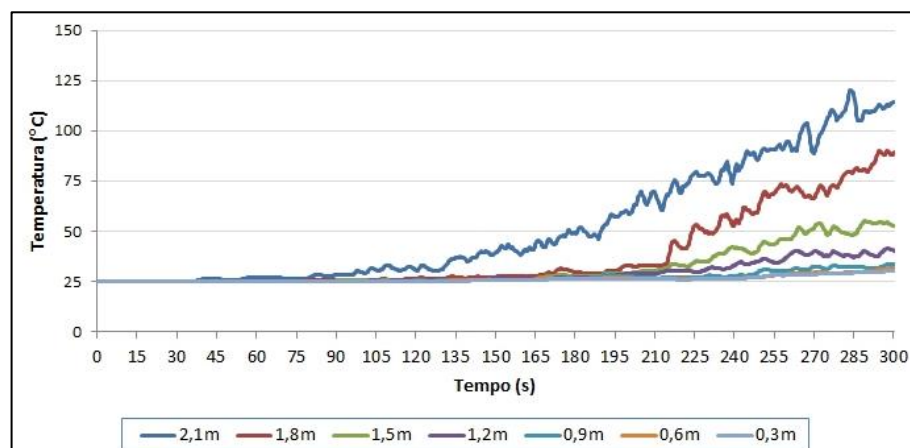


Gráfico 78 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-100plus

Imagem 223 – Instante $t = 0$ s.

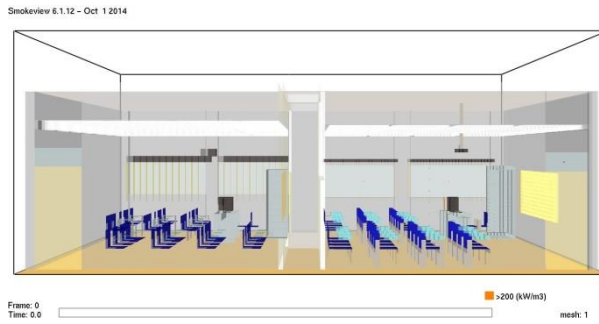


Imagem 224 – Instante $t = 15$ s.

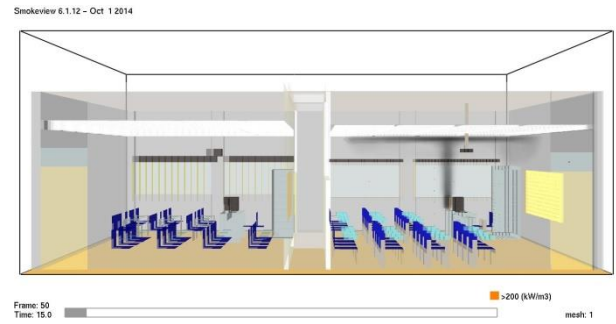


Imagem 225 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 226 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 227 – Instante $t = 120$ s.

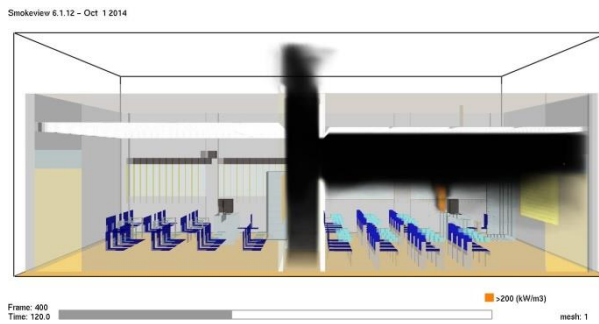


Imagem 228 – Instante $t = 180$ s.

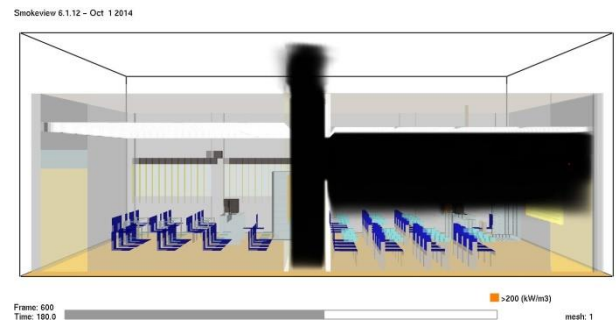


Imagem 229 – Instante $t = 240$ s.

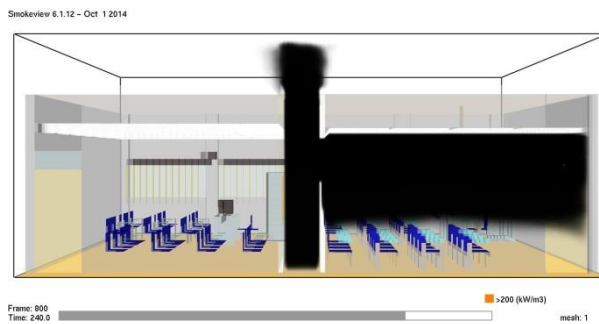


Imagem 230 – Instante $t = 300$ s.

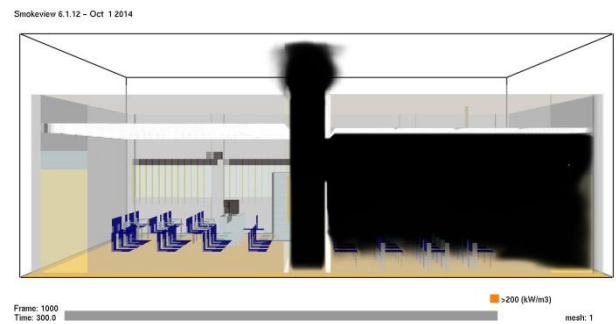


Gráfico 79 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

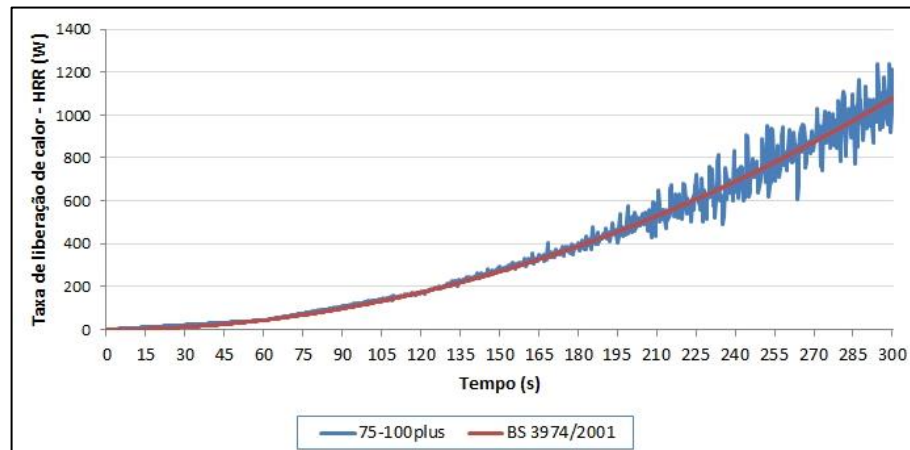


Gráfico 80 – Altura da camada livre de fumaça.

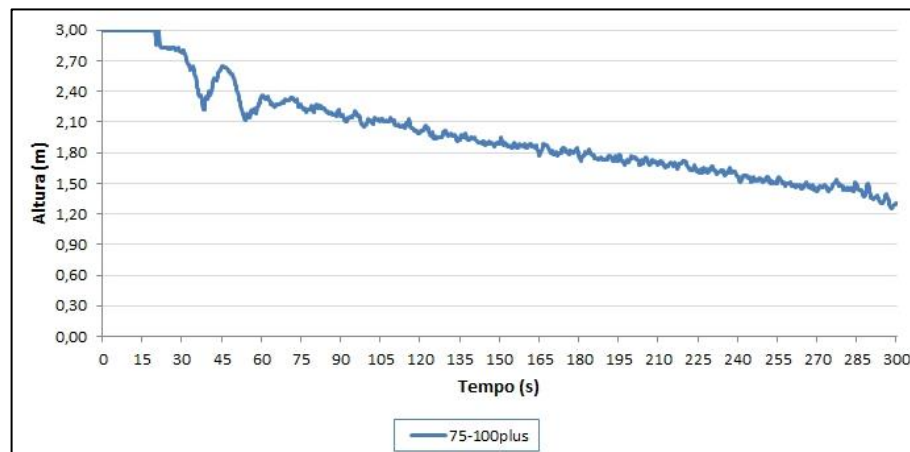
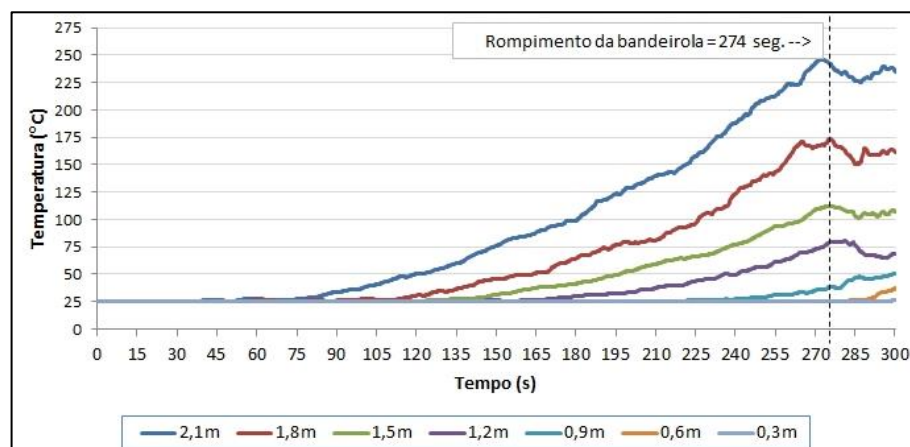


Gráfico 81 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 75-100plus open

Imagem 231 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 232 – Instante $t = 15$ s.

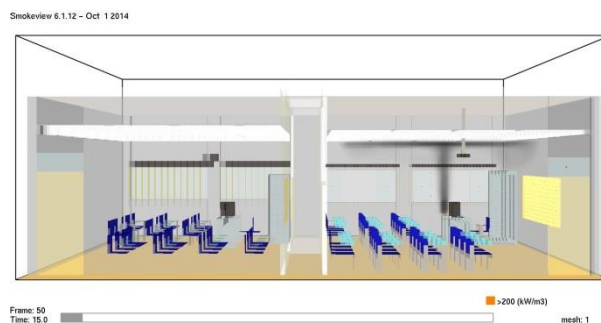


Imagem 233 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 234 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 235 – Instante $t = 120$ s.

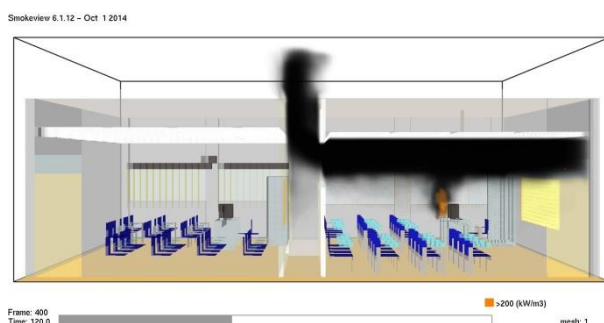


Imagem 236 – Instante $t = 180$ s.

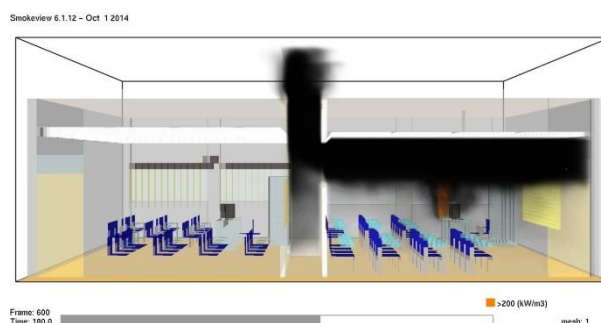


Imagem 237 – Instante $t = 240$ s.

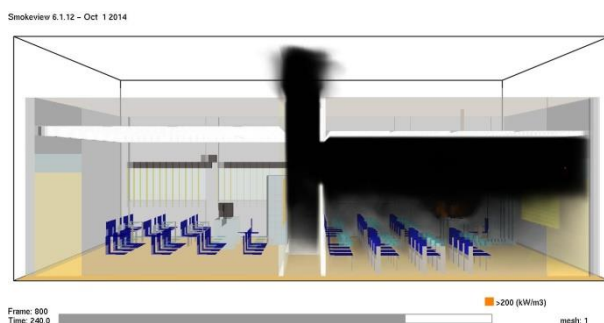


Imagem 238 – Instante $t = 300$ s.

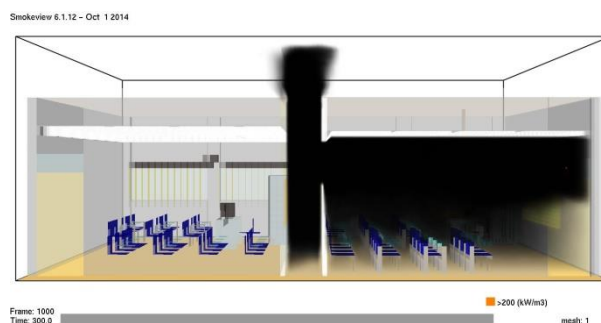


Gráfico 82 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

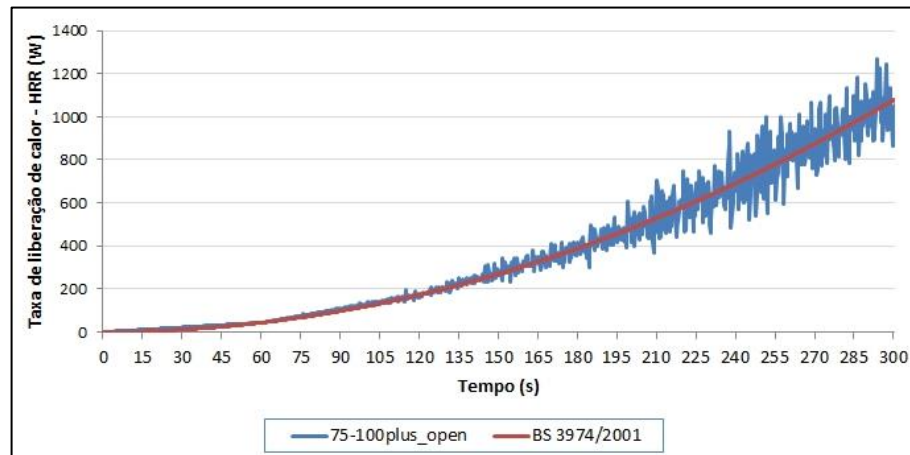


Gráfico 83 – Altura da camada livre de fumaça.

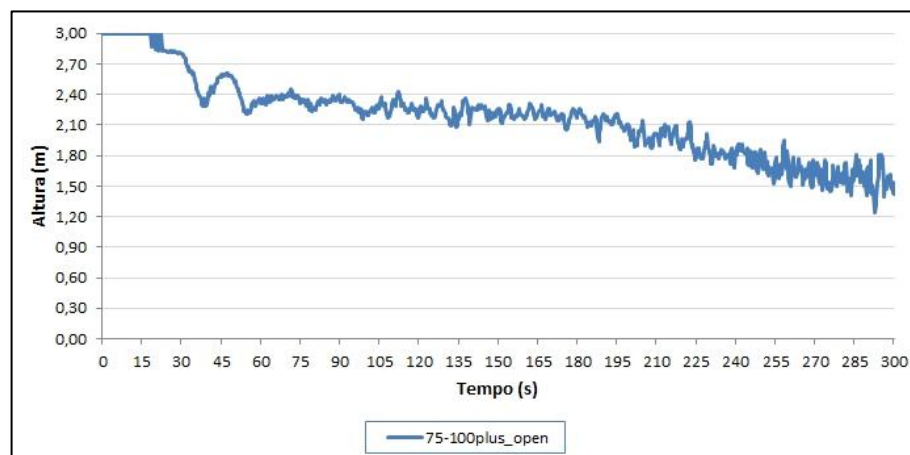
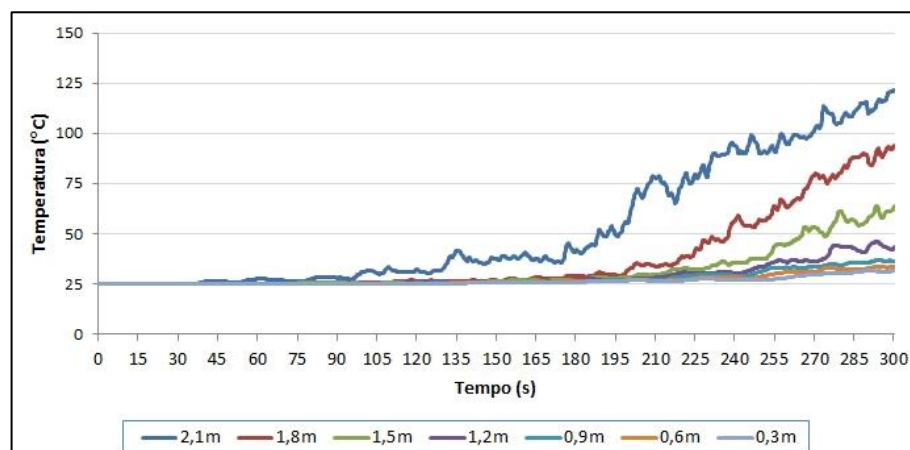


Gráfico 84 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-25plus

Imagem 239 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 240 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 241 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 242 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 243 – Instante $t = 120$ s.



Imagem 244 – Instante $t = 180$ s.

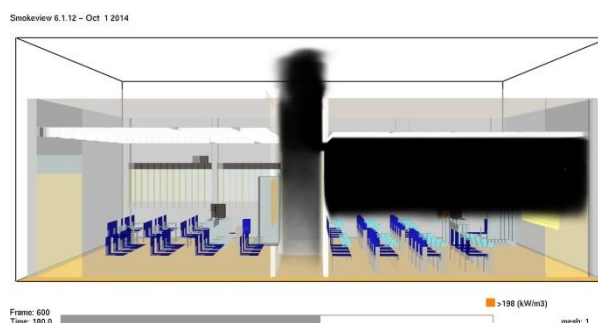


Imagem 245 – Instante $t = 240$ s.

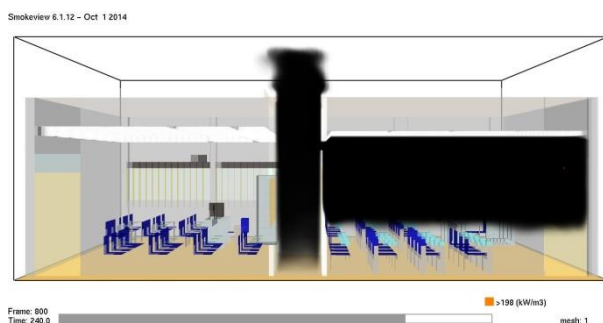


Imagem 246 – Instante $t = 300$ s.

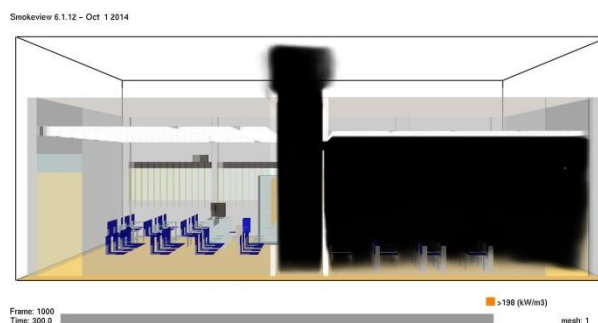


Gráfico 85 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

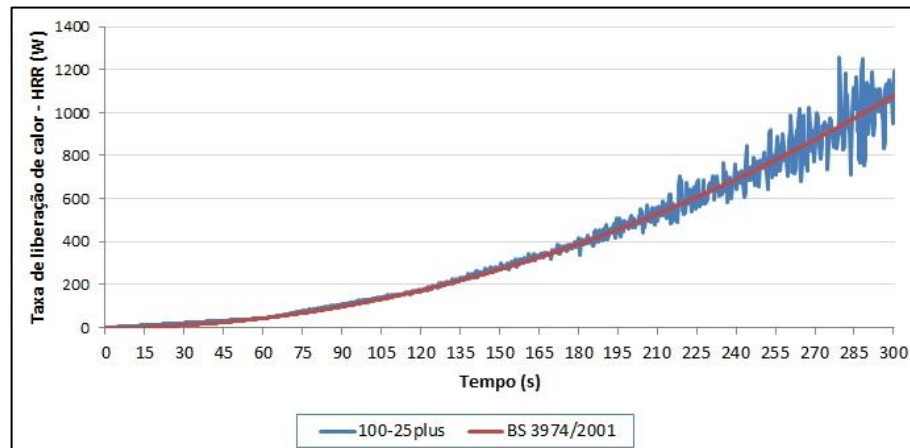


Gráfico 86 – Altura da camada livre de fumaça.

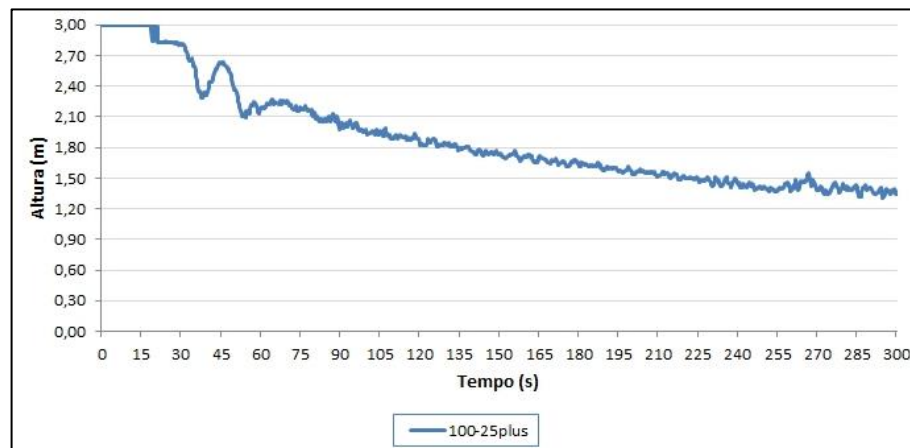
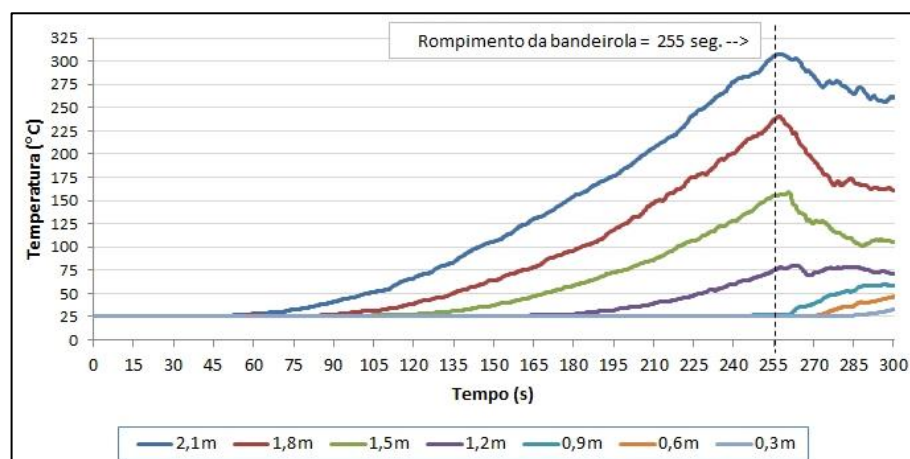


Gráfico 87 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-25plus open

Imagem 247 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 248 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 249 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 250 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 251 – Instante $t = 120$ s.

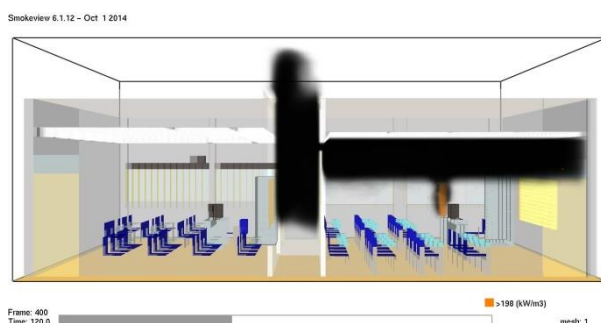


Imagem 252 – Instante $t = 180$ s.

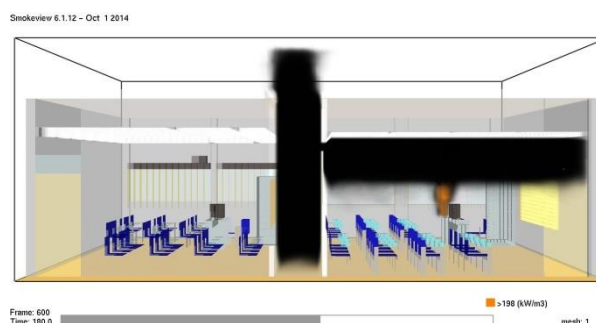


Imagem 253 – Instante $t = 240$ s.

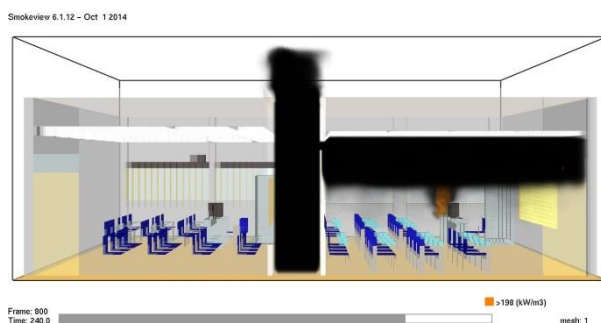


Imagem 254 – Instante $t = 300$ s.

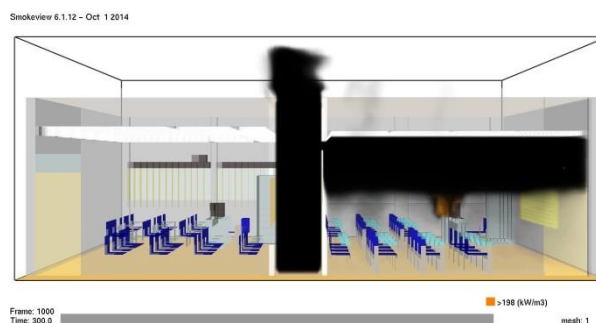


Gráfico 88 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

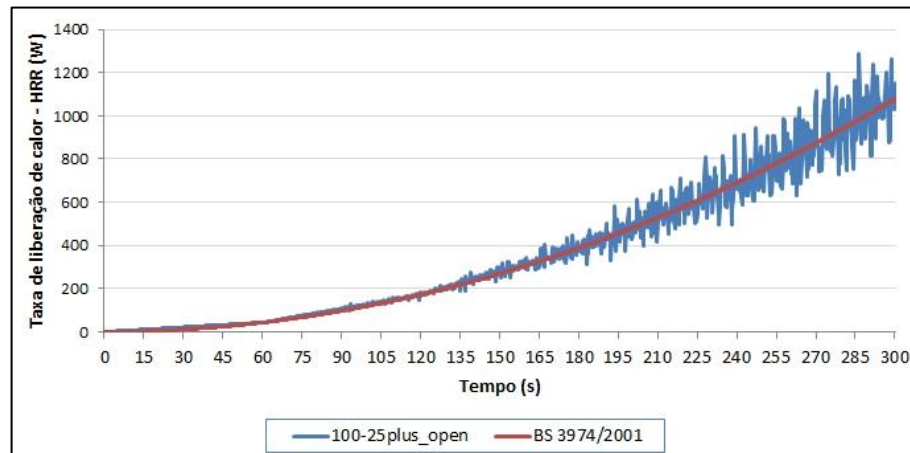


Gráfico 89 – Altura da camada livre de fumaça.

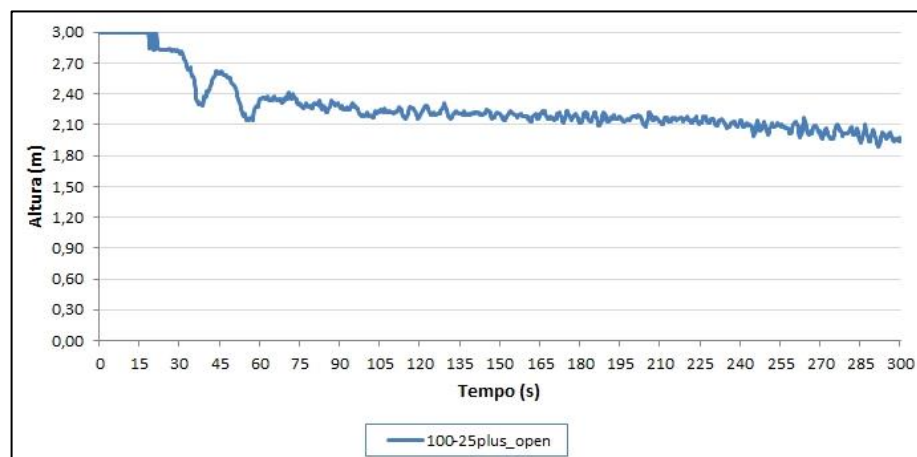
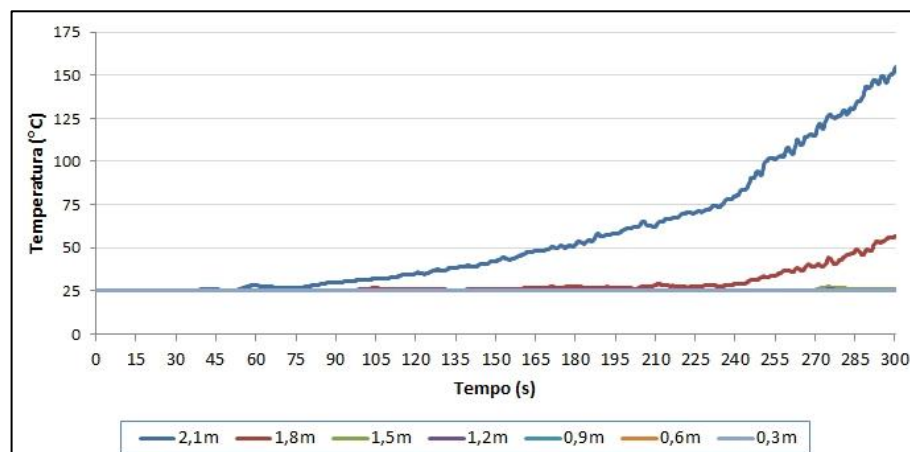


Gráfico 90 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-50plus

Imagem 255 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 256 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 257 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 258 – Instante $t = 60$ s.

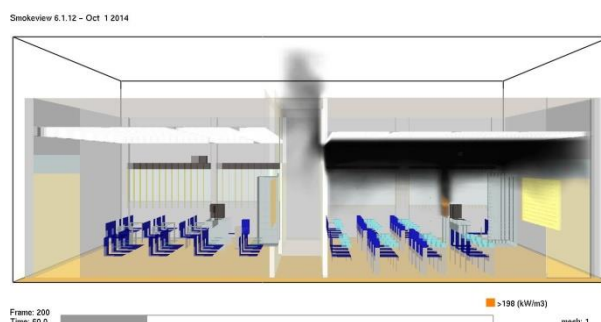


Imagem 259 – Instante $t = 120$ s.

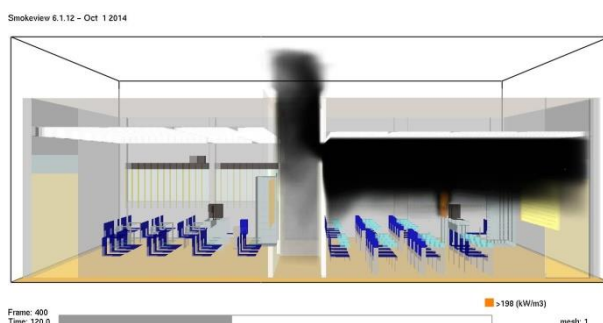


Imagem 260 – Instante $t = 180$ s.

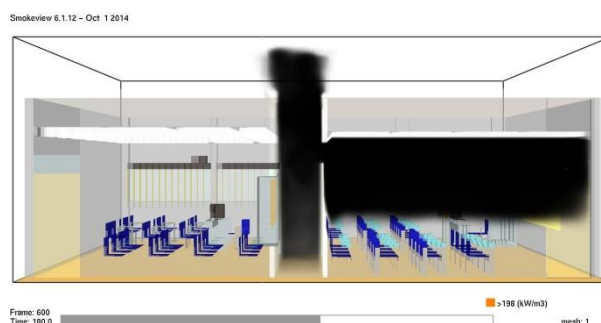


Imagem 261 – Instante $t = 240$ s.

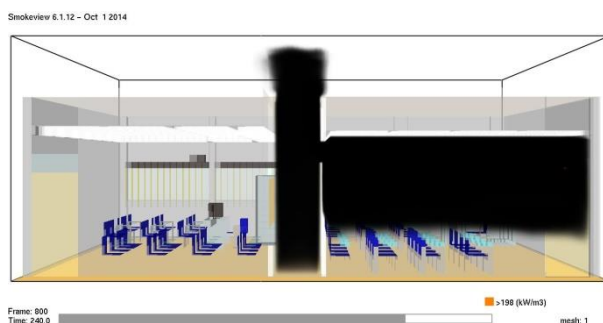


Imagem 262 – Instante $t = 300$ s.

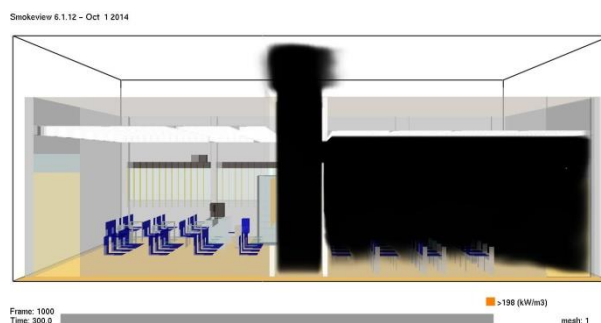


Gráfico 91 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

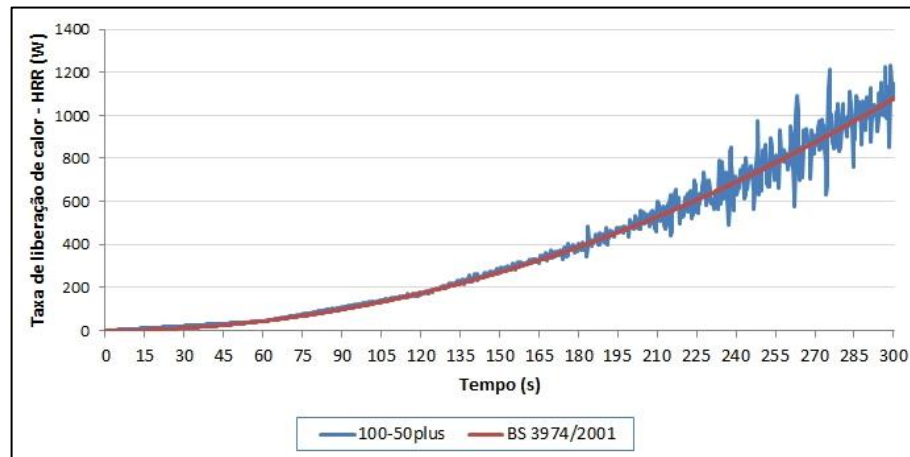


Gráfico 92 – Altura da camada livre de fumaça.

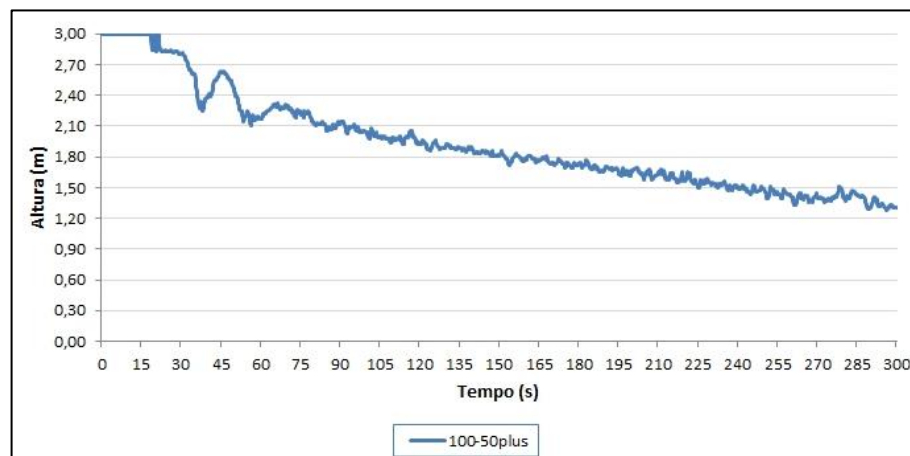
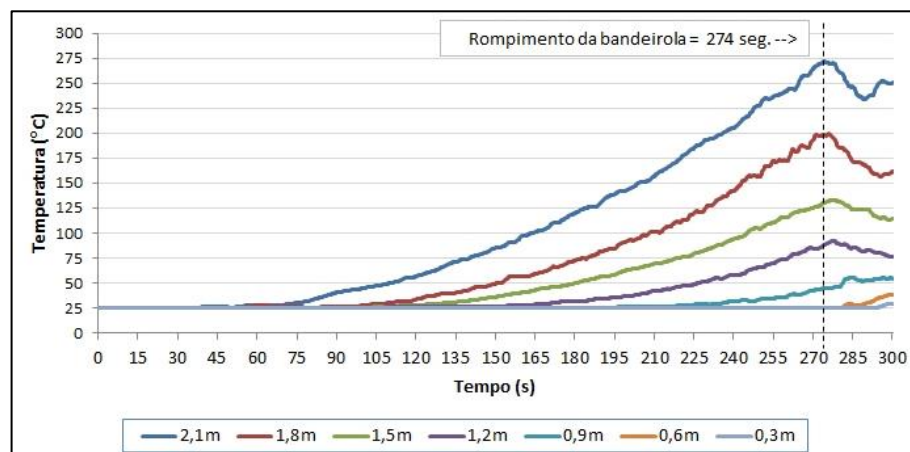


Gráfico 93 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-50plus open

Imagem 263 – Instante t= 0s.

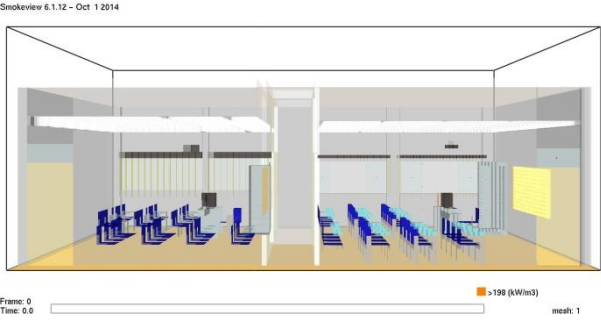


Imagem 264 – Instante t= 15s.

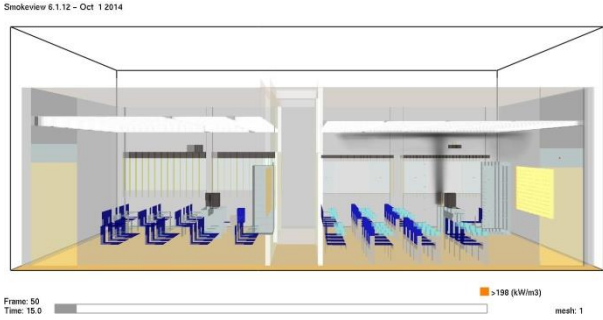


Imagem 265 – Instante t= 30s.

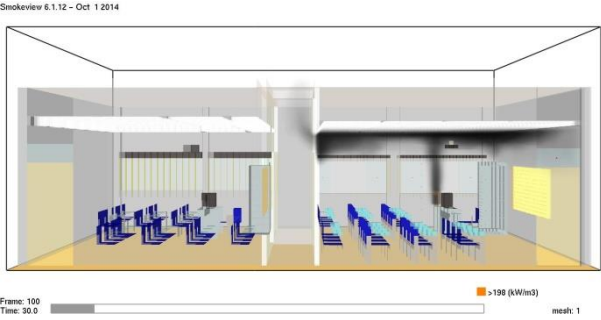


Imagem 266 – Instante t= 60s.

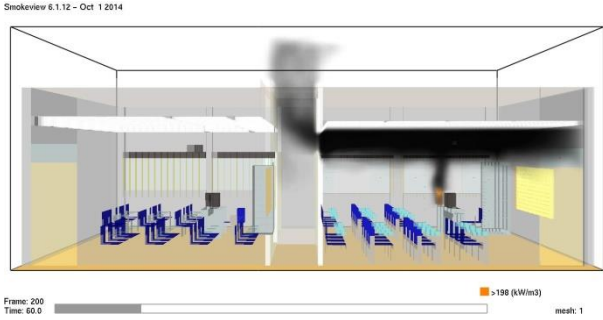


Imagem 267 – Instante t= 120s.

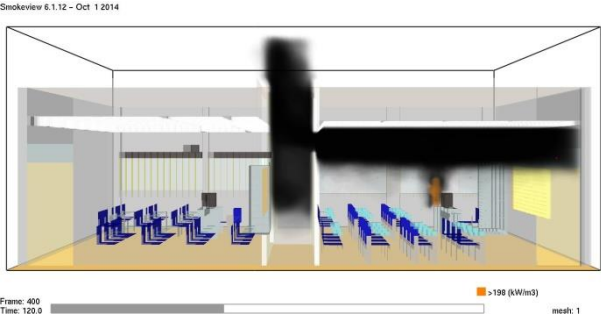


Imagem 268 – Instante t= 180s.

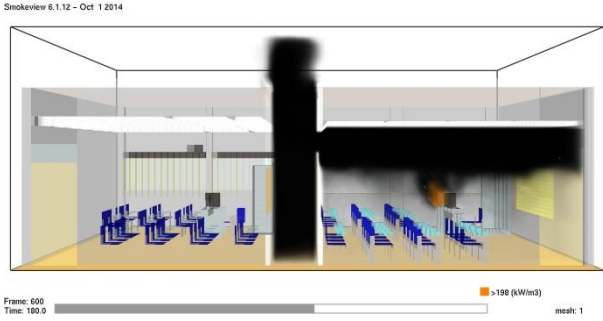


Imagem 269 – Instante t= 240s.

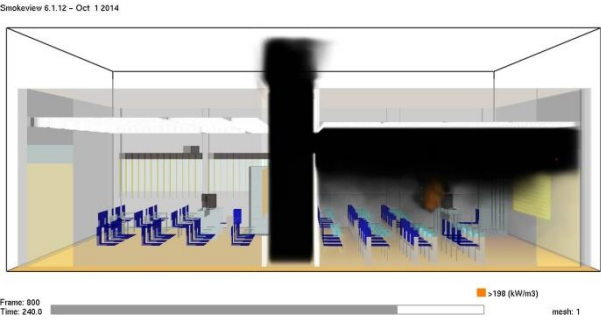


Imagem 270 – Instante t= 300s.

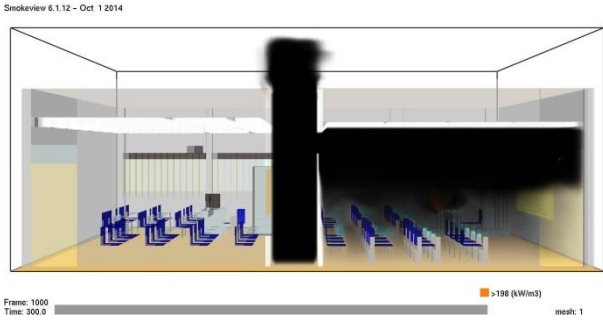


Gráfico 94 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

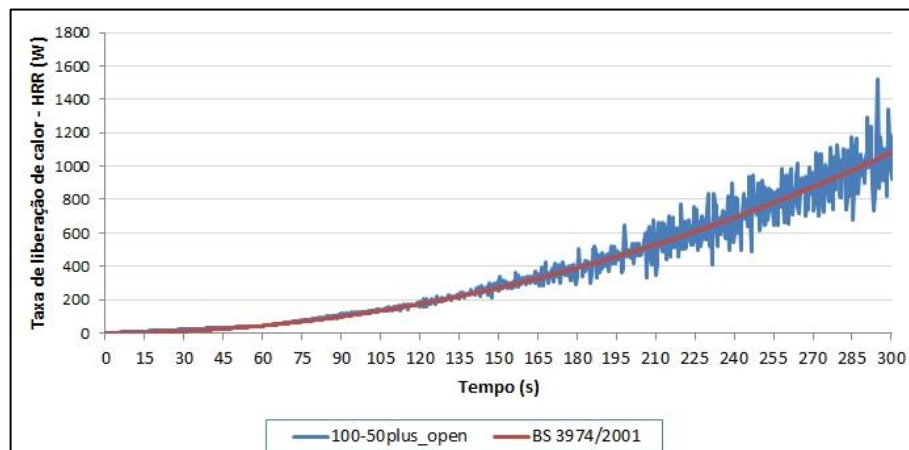


Gráfico 95 – Altura da camada livre de fumaça.

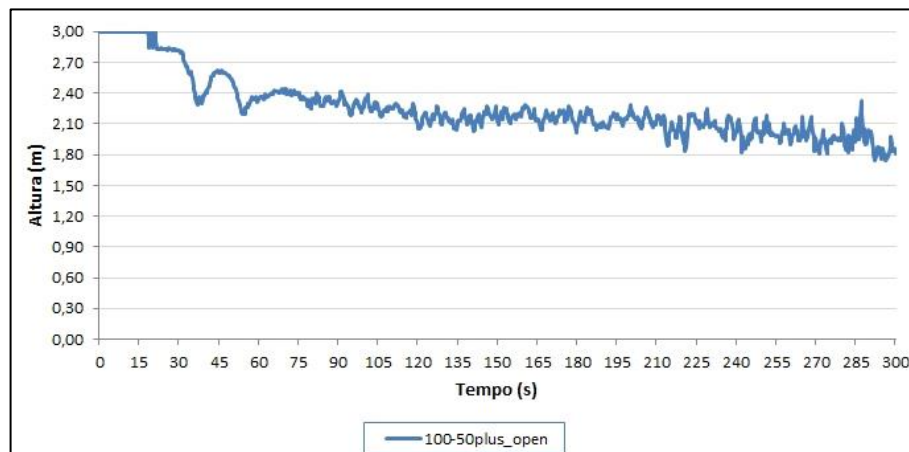
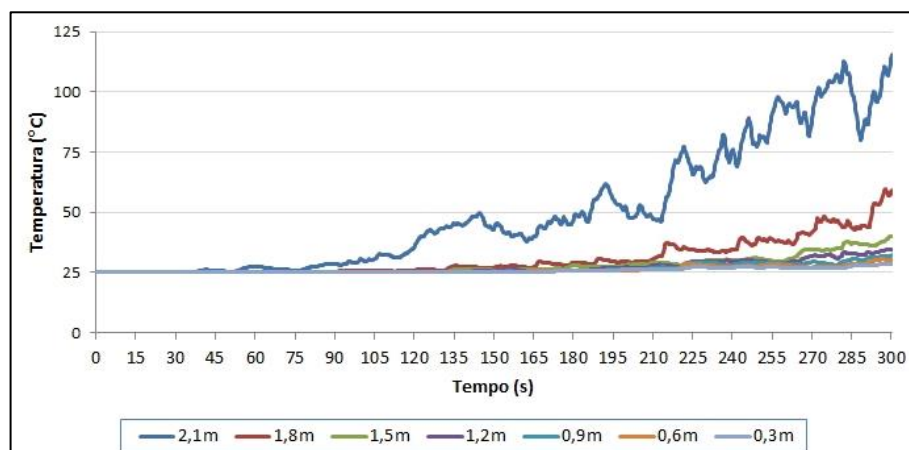


Gráfico 96 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-75plus

Imagem 271 – Instante t= 0s.



Imagem 272 – Instante t= 15s.



Imagem 273 – Instante t= 30s.

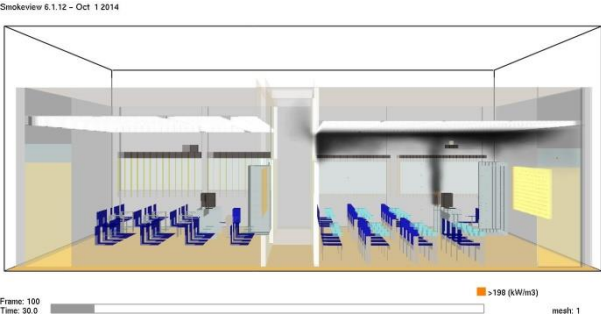


Imagem 274 – Instante t= 60s.

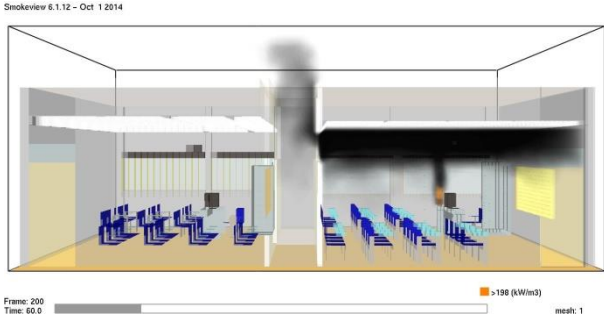


Imagem 275 – Instante t= 120s.

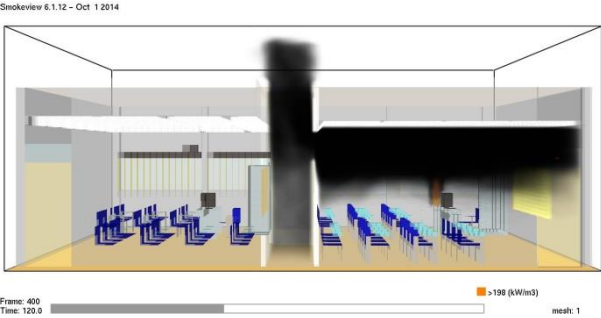


Imagem 276 – Instante t= 180s.

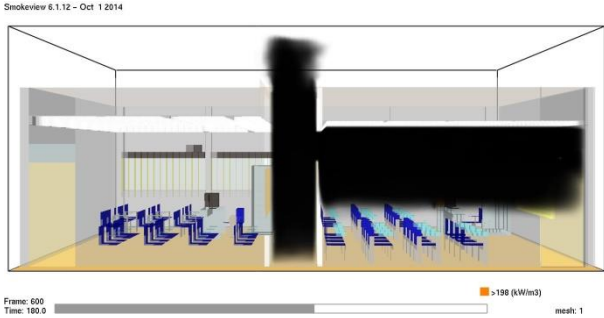


Imagem 277 – Instante t= 240s.

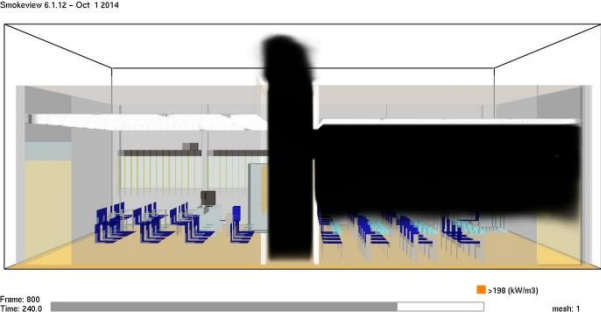


Imagem 278 – Instante t= 300s.

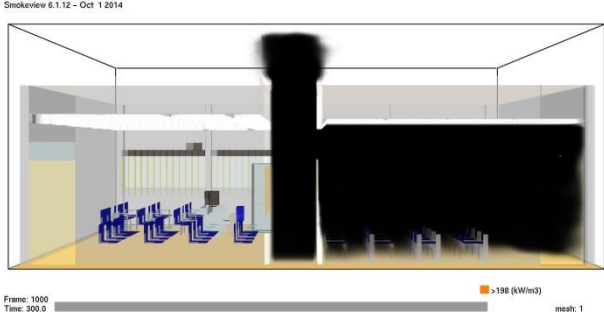


Gráfico 97 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

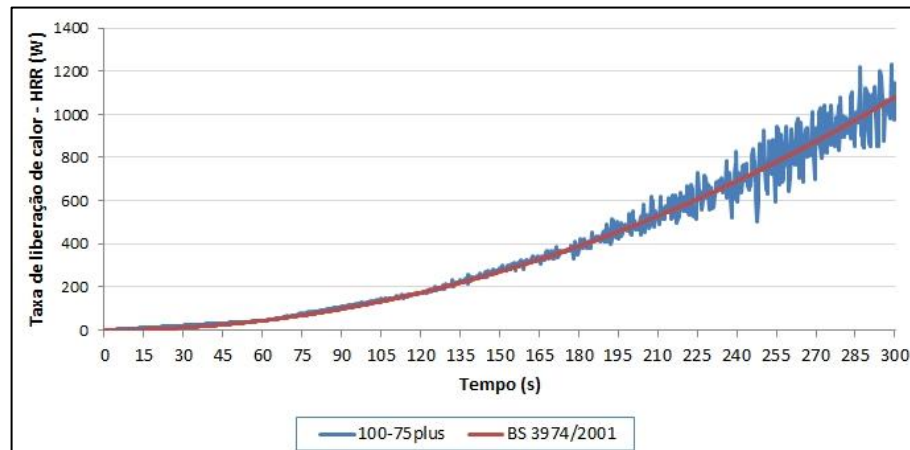


Gráfico 98 – Altura da camada livre de fumaça.

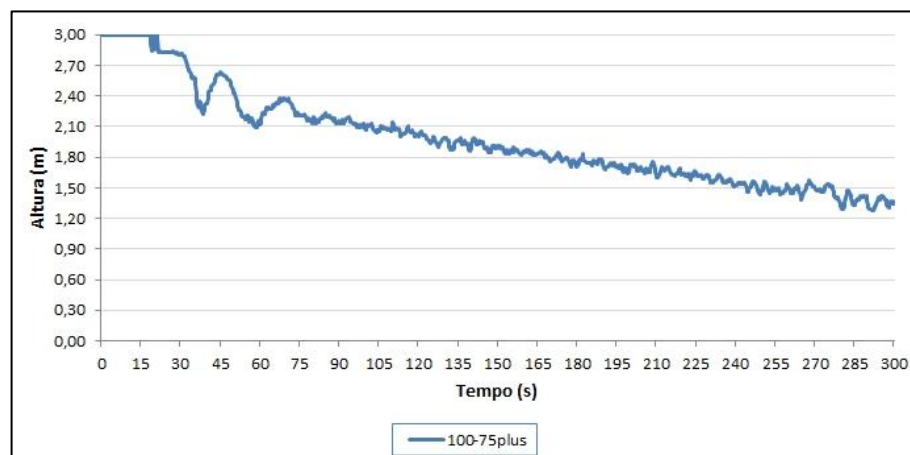
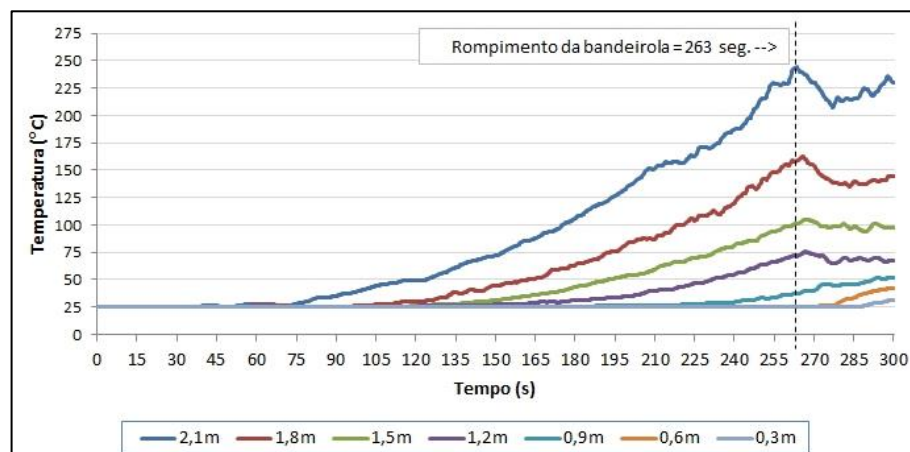


Gráfico 99 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-75plus open

Imagem 279 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 280 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 281 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 282 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 283 – Instante $t = 120$ s.

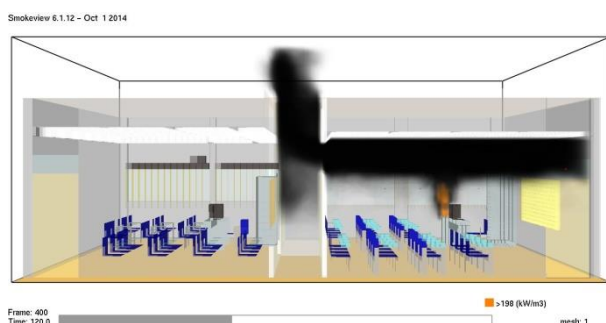


Imagem 284 – Instante $t = 180$ s.

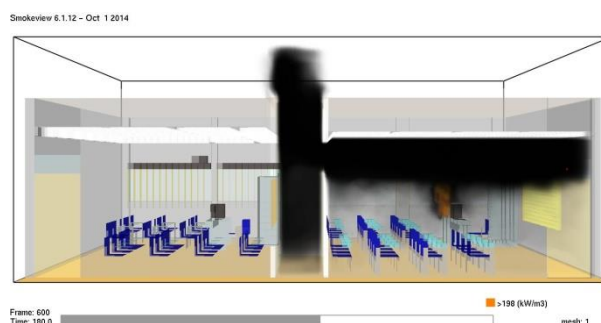


Imagem 285 – Instante $t = 240$ s.

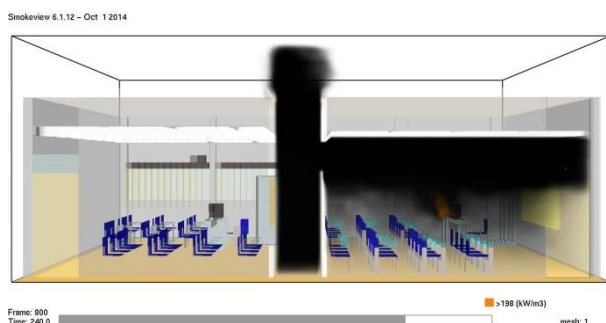


Imagem 286 – Instante $t = 300$ s.

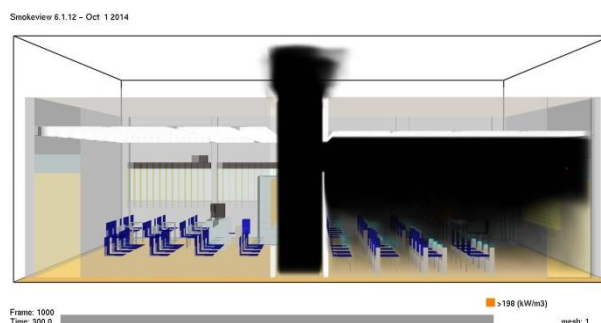


Gráfico 100 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

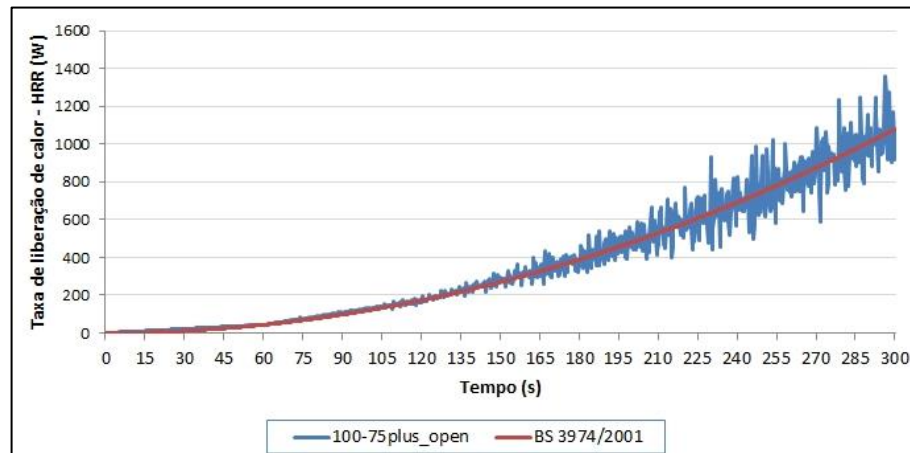


Gráfico 101 – Altura da camada livre de fumaça.

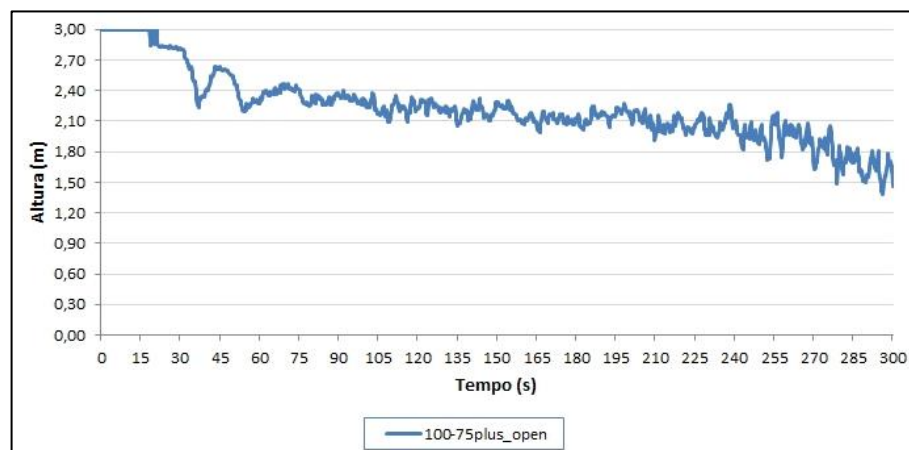
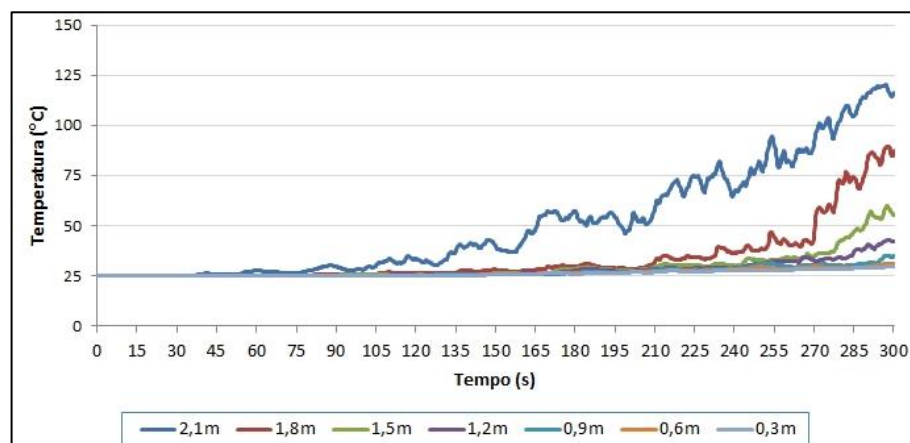


Gráfico 102 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-100plus

Imagem 287 – Instante $t = 0$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

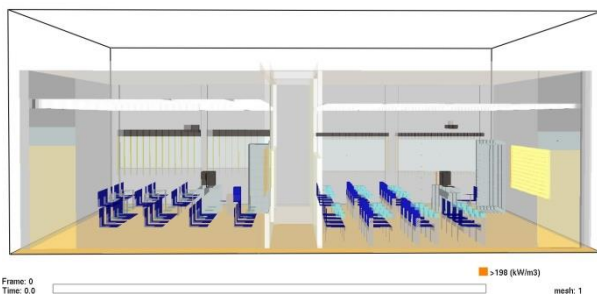


Imagem 288 – Instante $t = 15$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

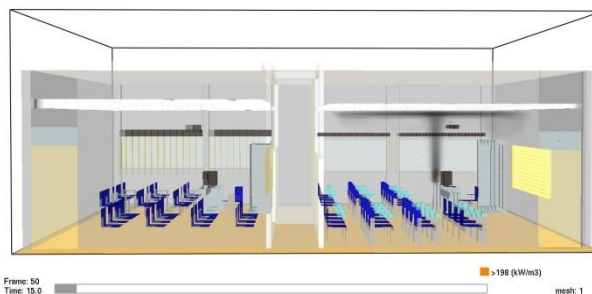


Imagem 289 – Instante $t = 30$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

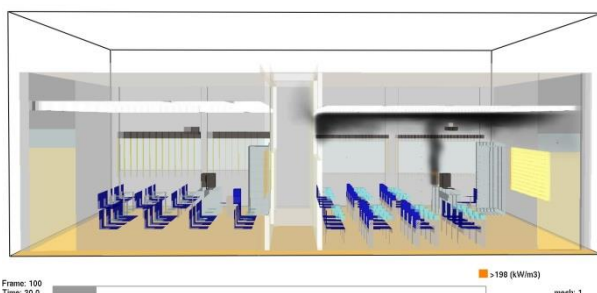


Imagem 290 – Instante $t = 60$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

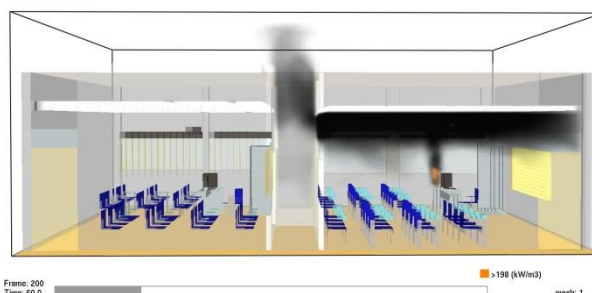


Imagem 291 – Instante $t = 120$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

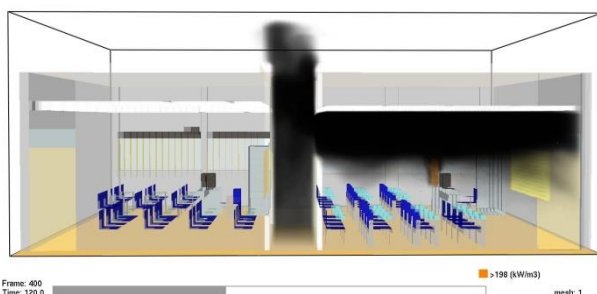


Imagem 292 – Instante $t = 180$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

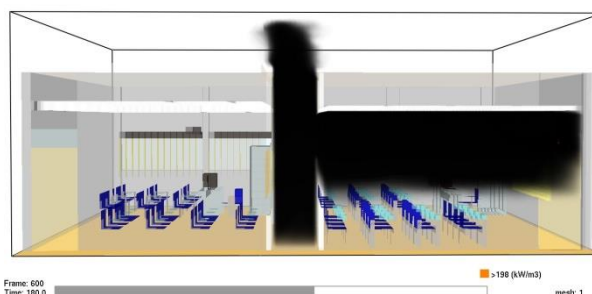


Imagem 293 – Instante $t = 240$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

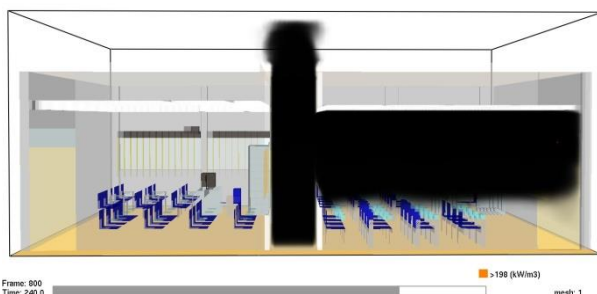


Imagem 294 – Instante $t = 300$ s.

Snokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

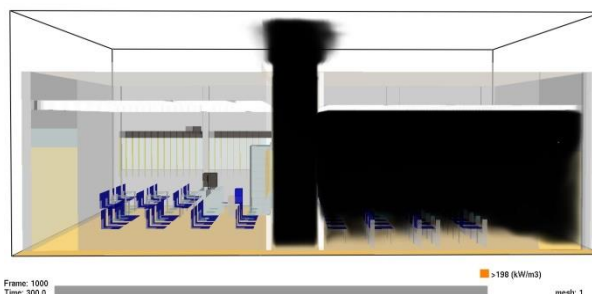


Gráfico 103 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normatizada e simulada.

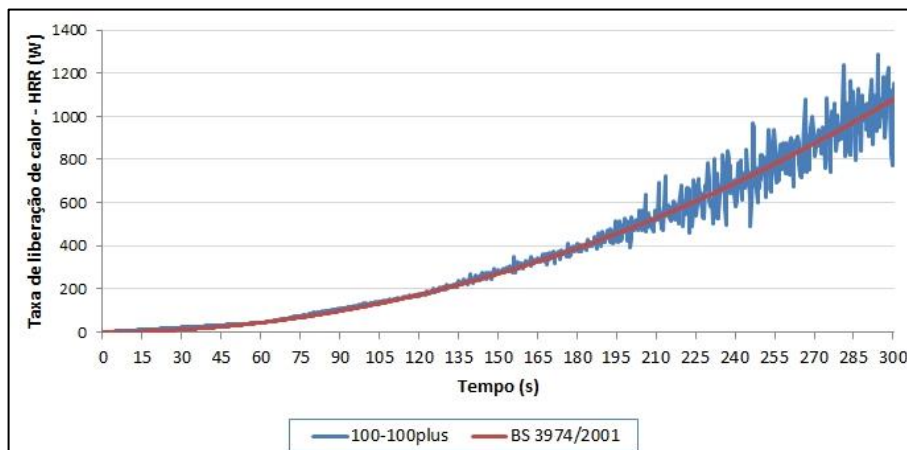


Gráfico 104 – Altura da camada livre de fumaça.

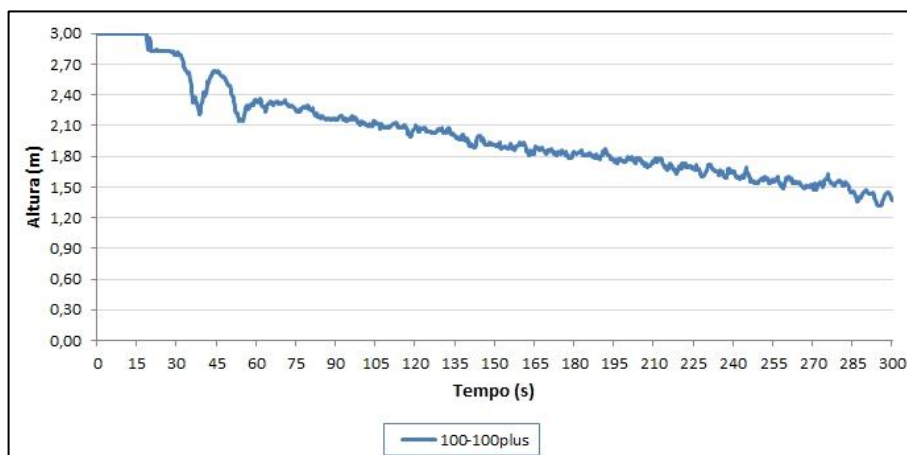
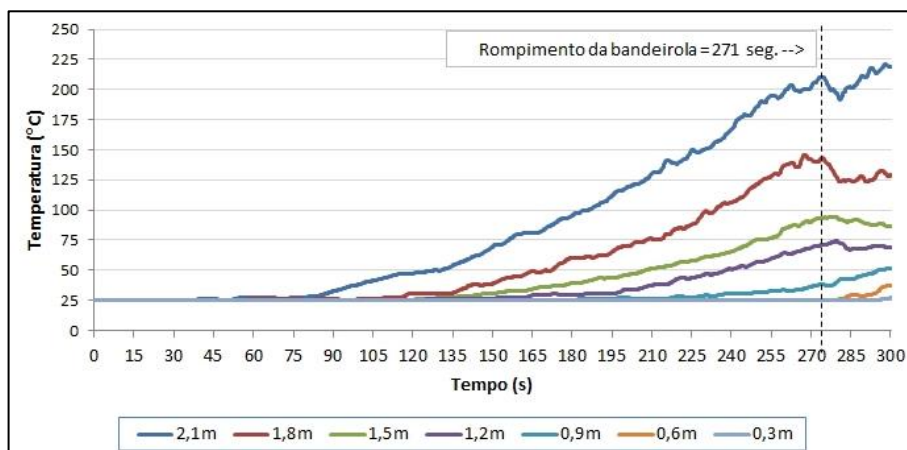


Gráfico 105 – Gradiente vertical de temperatura.



Caso 100-100plus open

Imagem 295 – Instante $t = 0$ s.



Imagem 296 – Instante $t = 15$ s.



Imagem 297 – Instante $t = 30$ s.



Imagem 298 – Instante $t = 60$ s.



Imagem 299 – Instante $t = 120$ s.

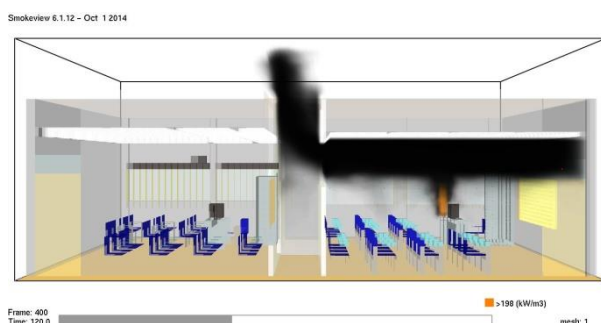


Imagem 300 – Instante $t = 180$ s.

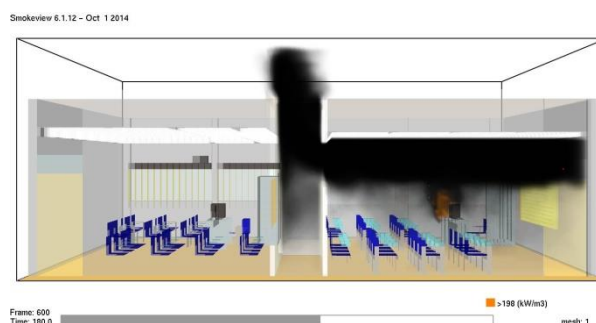


Imagem 301 – Instante $t = 240$ s.

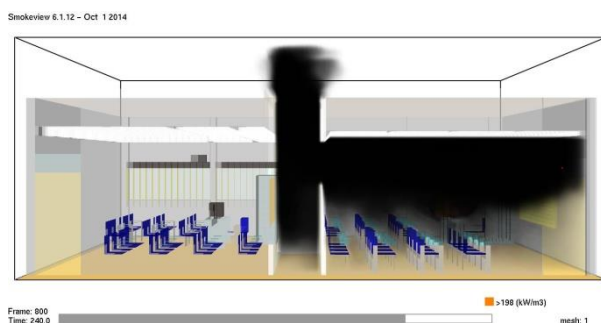


Imagem 302 – Instante $t = 300$ s.

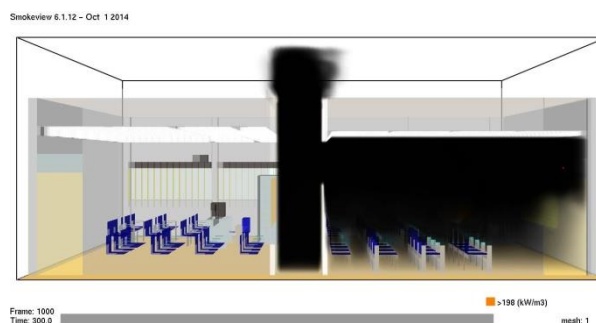


Gráfico 106 – Comparação da taxa de liberação de calor [HRR] normalizada e simulada.

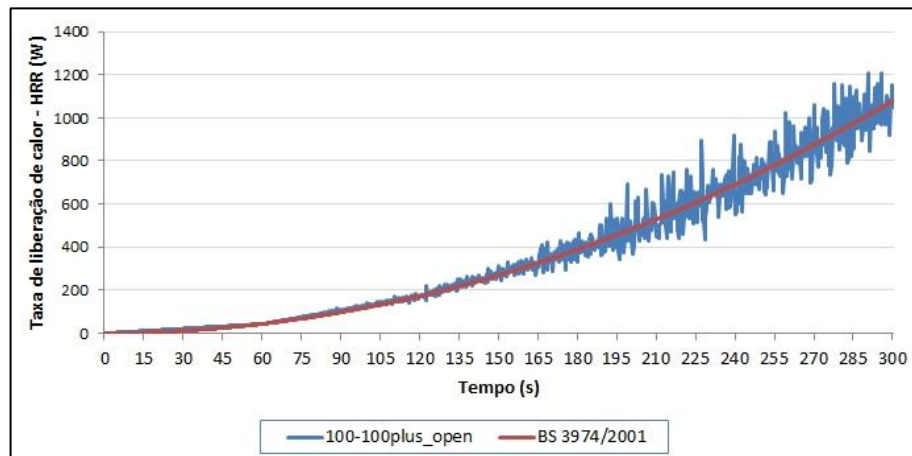


Gráfico 107 – Altura da camada livre de fumaça.

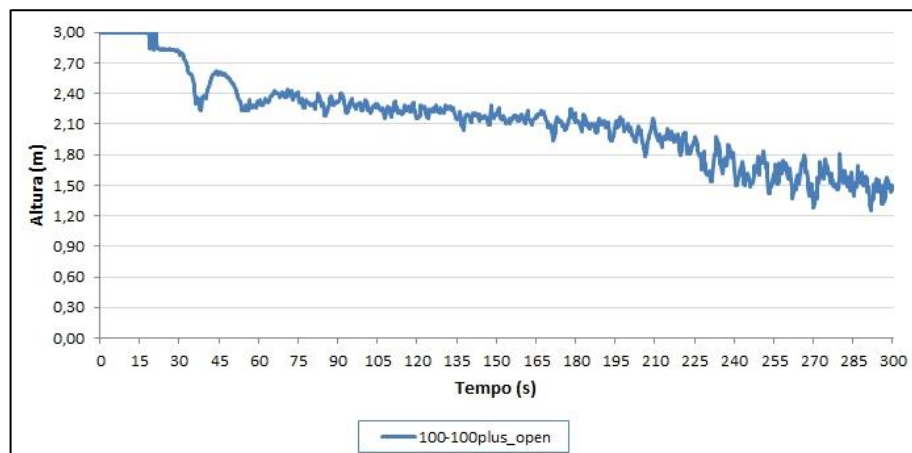


Gráfico 108 – Gradiente vertical de temperatura.

